



EESTI MAAÜLIKOOL
Metsandus- ja maaehitusinstituut

Tenno Liivatalu

**SOOJUS- JA NIISKUSTEHNILISED PROBLEEMID PALK- JA
PLOKKHOONETE PIIRDETARINDITEL NING
RENOVEERIMISLAHENDUSED**

HYGROTHERMAL PROBLEMS IN LOG AND BLOCK
BUILDING ENCLOSURES AND RENOVATION SOLUTIONS

Ehitusinseneriõppe lõputöö
Maaehituse õppekava

Juhendaja: lektor Kaarel Sahk, MSc

Tartu 2021

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51006			
Autor: Tenno Liivatalu		Õppekava: Maaehitus	
Pealkiri: Soojus- ja niiskustehnilised probleemid palk- ja plokkhoonete piirdetarinditel ning renoveerimislahendused			
Lehekülgi: 62	Jooniseid: 6	Tabeleid: 6	Lisasid: 0
Osakond / Õppetool:		Metsandus- ja maaehitusinstituut / Maaehituse ja veemajanduse õppetool	
ETIS-e teadusvaldkond ja CERC S-i kood:		Tsiviilehitus T220	
Juhendaja(d):		lektor Kaarel Sahk	
Kaitsmiskoht ja -aasta:		Tartu 2021	
<p>Kõiki hooneid tuleb aeg-ajalt renoveerida elanikele mugavamaks, kaasaegsetele nõuetele vastavaks või hoone sisekliima parandamiseks. Seoses ehitus- ja energiahindade pideva kasvuga ning energiatõhususe nõuete karmistumisega, on vajadus vastavalt hoone probleemidele leida paljude erinevate lahenduste seast sobivaim.</p> <p>Magistritöö eesmärgiks oli kirjeldada palk- ja plokkhoonete soojus- ja niiskustehnilisi probleeme ning uurida leitud probleemide võimalikke renoveerimislahendusi hoone soojus- ja niiskustehnilise toimivuse parandamiseks.</p> <p>Erinevate probleemide leidmiseks kasutati Eesti Maaülikoolis läbi viidud magistritöid ja teadusartikleid. Tutvustati erinevate soojus- ja niiskustehniliste probleemide olemust ja anti ülevaade probleemidest erinevate hoone tarindite kaupa. Kirjeldatud probleemidele lahenduste leidmiseks kasutati teadusandmebaasidest kättesaadavaid tõendupõhiseid artikleid, mis käsitlesid uuringuid ja võrdluseid erinevatest renoveerimislahendustest. Saadud tulemusi võrreldi lõputöö autori kogemusega ja Eesti Maaülikoolis varasemalt läbi viidud lõputööga.</p> <p>Teadusartiklites ja Eesti Maaülikoolis läbi viidud lõputöös leitud soojus- ja niiskustehnilised probleemid olid sarnased ja seni läbi viidud uuringutele tuginedes saab teha üldistusi vanadel palk- ja plokkhoonetel esineda võivate kahjustuste kohta. Niiskuskahjustused on peamiselt</p>			

tekkinud puudulikust sademevee eemale juhtimisest ja kõrgeist niiskussisaldusest põranda aluses ruumis. Termografeerimisel leiti külmasildasid ja õhulekkeid kõigis hoone välispiirdes esinevates sõlmedes. Arvestades tänapäevaseid energiatõhususe miinimumnõudeid vajavad kõik uuritud hooned lisasoojustamist.

Põhjalikumalt käsitleti vundamentide ja põrandate lahendusi, sest viimased on pidevas kokkupuutes niiskusega ja pikaajalist lahendust on keeruline teostada. Lisaks analüüsiti ka kõikide teiste piirdetarindite renoveerimislahendusi. Leiti, et mitmed praktikas levinud lahendused ei pruugi olla kõige kestvamad ning alternatiivseid võimalusi on kirjanduses uuritud.

Märksõnad: Renoveerimine, ehitusfüüsika, energiatõhusus, teoreetiline kirjanduse analüüs

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51006		Abstract of Master’s Thesis	
Author: Tenno Liivatalu		Curriculum: Rural Engineering	
Title: Hygrothermal problems in log and block building enclosures and renovation solutions			
Pages: 62	Figures: 6	Tables: 6	Appendixes: 0
Department / Chair:		Institute of Forestry and Rural Engineering/ Chair of Rural Building and Water Management	
Field of research and (CERC S) code:		Civil engineering T220	
Supervisors:		lecturer Kaarel Sahk	
Place and date:		Tartu 2021	
<p>All buildings need to be renovated from time to time to make them more comfortable for the residents, to meet more modern requirements or to improve the indoor climate of the building. Due to the constant rise in construction and energy prices and the tightening of energy efficiency requirements, there is a need to find the most suitable of many different solutions according to the problems.</p> <p>The first goal of the master's thesis was to describe the problems of log and block buildings hygrothermal performance. The second goal was to study possible renovation solutions to the problems found to improve the hygrothermal performance of the building.</p> <p>To find various problems, research articles and master's thesis conducted at the Estonian University of Life Sciences were used. The nature of various heat and moisture technical problems was introduced in more detail and an overview of the problems by different building structures was given. Research articles were used to find solutions to the problems described, and studies and comparisons of different renovation solutions were sought. The obtained results were analyzed with the experience of the author of the dissertation and with the thesis previously performed at the Estonian University of Life Sciences.</p> <p>The thermal and moisture technical problems found in the research articles and in the thesis carried out at the Estonian University of Life Sciences were similar, and based on the research</p>			

carried out so far, generalizations can be made about the possible damages on old log and block buildings. Moisture damages were caused by poor drainage of rainwater and high moisture content in the timber-frame crawl space. Cold bridges and air leakages were found during thermography in all joints on the building enclosure. Considering today's minimum energy efficiency requirements, all the studied buildings need additional insulation.

Foundation and floor solutions were the most discussed, as the latter are in constant contact with moisture and it is difficult to implement a long-term solution. In addition, renovation solutions for all other enclosure structures were analyzed. It was found that many of the solutions common in practice may not be the most durable, and alternative options have been studied in the literature.

Keywords: Renovation, building physics, energy efficiency, theoretical literature analysis

Sisukord

SISSEJUHATUS	7
1. METOODIKA	10
2. PEAMISED SOOJUS- JA NIISKUSTEHNILISED PROBLEEMID PALK- JA PLOKKHOONETE PIIRDETARINDITEL	13
2.1 Soojus- ja niiskustehnilised probleemid palk- ja plokkhoonetel	13
2.1.1 Vundamendid	18
2.1.2 Põrandad	19
2.1.3 Seinad	21
2.1.4 Avatäited	23
2.1.5 Vahelaed	25
3. SOOJUS- JA NIISKUSTEHNILISTE PROBLEEMIDEGA PALK- JA PLOKKHOONETE RENOVEERIMINE	26
3.1 Hoonete renoveerimine	26
3.1.1 Vundamendid	28
3.1.2 Põrandad	33
3.1.3 Seinad	35
3.1.4 Avatäited	38
3.1.5 Vahelaed	41
4. ARUTELU	43
KOKKUVÕTE	51
KASUTATUD KIRJANDUS	54

SISSEJUHATUS

Euroopas pööratakse järjest rohkem tähelepanu ehitiste renoveerimisele (Jensen, Maslesa 2015), kuna hooned moodustavad umbes 40% kogu Euroopa energiatarbimisest ning oma pika eluea tõttu on paljud neist tehniliselt vananenud ning energiatõhusus muutunud ebaefektiivseks (EU direktiiv 2010 L153/13; Jensen, Maslesa 2015). Energiahindade tõus suurendab energiatarbimise majanduslikku tähtsust ja mõtteviisi muutumist energiatõhususe suunas. Teadlikkus tõhusast energia tarbimisest on viimastel aastatel märkimisväärselt suurenenud (Ástmarsson jt 2013) ning jätkusuutlik moderniseerimine ja renoveerimine seetõttu aktuaalne (EU direktiiv 2010 L153/13). Hoone eluea pikendamiseks ja kinnisvara väärtuse säilitamiseks on oluline ehitisi korralikult hooldada (Jensen, Maslesa 2015). Renoveerimisega säilitatakse lisaks ajalooline pärand ning emotsionaalne ja perekondlik väärtus (Kes tahab... 2020).

Vanade hoonete omanikel võib tekkida soov enda elukeskkonda parandada, mugavdada või meelepärasemaks kujundada. Vanadel hoonetel on sagedamini probleemideks lagunev konstruktsioon ja vähene soojapidavus. Üldkoormustele vastavalt dimensioneeritud ja keskkonnamõjude eest kahjustamata kandekonstruktsioonid suudavad säilitada enda funktsiooni ka peale pikka ekspluatatsiooni ja ei vaja peatselt välja vahetamist (Rebane, Russak 2019; Kiisel 2019; Nemvalts 2016). Ilmastiku eest kaitsvate tarindite amortiseerumisele mitte reageerimine ja üldise hoolduse puudumine soodustab hoone kahjustumist keskkonnamõjude tõttu (Jensen, Maslesa 2015).

Peamised takistused renoveerimistöid alustada soovival inimesel seisnevad majanduslike stiimulite puudumises, vähestes teadmistes ja usaldusväärse informatsiooni kättesaadavuses (Ástmarsson jt 2013; Thomsen jt 2016). Silmaga nähtavate kahjustuste ilmnemisel peaks probleemi tõsidust hindama spetsialist, kuid sotsiaalmeediast ilmneb inimeste soov soojus- ja niiskustehniliste probleemide korral ise neid lahendada. Spetsialisti nõuanded võivad tunduda ebavajalikud, kuna puuduliku soojapidavuse ja liigsest niiskusest tingitud probleemidele on pealtnäha lihtsad lahendused – hoonet on vaja soojustada ja vesi hoonest eemal hoida. Renoveerimist alustavale inimesele tunduvad nimetatud tööd esialgu lihtsad.

Renoveerimistöode käigus tekkinud probleemide lahendamiseks otsitakse informatsiooni internetist, näiteks materjalitootjate kodulehtedelt, või pöörduakse sotsiaalmeedia ja tutvusringkonna poole, püüdes leida inimesi, kes sarnaste probleemidega on kokku puutunud. Sotsiaalmeediast või naabrilt saadud informatsioon ei asenda spetsialisti nõuannet, kes vajadusel objekti kohapeal hindab ja arvestab renoveerimislahendusi pakkudes hoone eripäradega.

Käesolev lõputöö on suunatud nii ehitusspetsialistidele kui ka inimestele, kellel puudub erialane ettevalmistus renoveerimistöode teostamiseks. Magistritöö võimaldab tõsta nii ehitusspetsialistide kui ka ise renoveerimist alustavate inimeste teadlikkust enamlevinud ehitusfüüsikalistest probleemidest palk- ja plokkhoonetel ja anda ülevaade peamistest teaduskirjanduses kajastatavatest renoveerimislahendustest. Lõputöö aitab ehitusliku erialase ettevalmistuseta isikutel ja ehitusspetsialistidel leida adekvaatset informatsiooni erinevate ehitusfüüsikaliste probleemide lahendamisest, et seda renoveerimistöode planeerimisel arvestada ning rakendada. Magistritöö aitab inimestel läbi täienenud teadmiste mõista, et renoveerimine on keerukas, vajab kompleksseid lahendusi ning lähenemist hoonele kui tervikule. Tõenduspõhised teoreetilised teadmised renoveerimisvõimalustest aitavad nii ehitusspetsialistidel kui ka hoone omanikel teha paremaid otsuseid renoveerimislahenduste leidmisel ja ellu viimisel. Ehitusfüüsikaliste probleemide korrektne käsitus võimaldab hooneid renoveerida energiatõhusamalt, arvestades seejuures karmistuvaid nõudeid. Magistritöös käsitletakse ehitusfüüsikalise aspekti all soojus- ja niiskustehnilisi probleeme ja lahendusi.

Käesoleva lõputöö eesmärgiks on anda ülevaade peamistest soojus- ja niiskustehnilistest probleemidest palk- ja plokkhoonetel ning võimalikest renoveerimislahendustest.

Lähtuvalt töö eesmärgist on püstitatud järgmised uurimisülesanded:

- 1) kirjeldada palk- ja plokkhoonete soojus- ja niiskustehnilisi probleeme;
- 2) kirjeldada palk- ja plokkhoonete renoveerimislahendusi hoonete soojus- ja niiskustehnilise toimivuse parandamiseks.

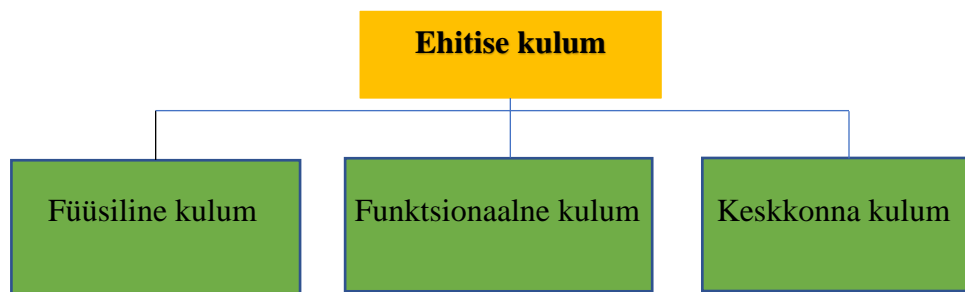
Lõputöö esimeses peatükis tuuakse välja peamised niiskus- ja soojustehnilised probleemid erinevatel palk- ja plokkhoone tarinditel. Varasematel aastatel on hoonete tehnilise seisukorra hindamisi Eesti Maaülikoolis läbi viidud korduvalt, mistõttu käesolevas töös hoonete seisukorra hindamist ei teostatud. Materjali lõputöö koostamiseks on kogutud varasematel aastatel kaitstud lõputöödest ja andmebaasidest kättesaadavatest teadusartiklitest.

Töö teises osas kirjeldatakse palk- ja plokkhoonete renoveerimislahendusi hoonete soojus- ja niiskustehnilise toimivuse parandamiseks kasutades tõenduspõhiseid allikaid ja Eesti Maaülikooli lõputöid. Renoveerimislahenduste pakkumisel keskendutakse teoreetilistele teadmistele, mida hoone omanikud või ehitusspetsialistid töö planeerimisel ja teostamisel võiksid vajada. Käesolev töö võimaldab kriitiliselt hinnata pakutavaid lahendusi ja nende sobivust ehitusfüüsikaliste probleemide lahendamisel ja energiatõhususe tõstmisel.

1. METOODIKA

Lõputöö metodoloogiline lähenemine on üldises plaanis ülesse ehitatud lähenemisele, et ehitistele (hooned ja rajatised) antaks nende kavandamisel ette eeldatav majanduslik eluiga, mis realiseeritakse ehitustegevuse käigus. Selline ehitise kronoloogilise eluea arvestamine algab ehitise kasutamise alguse hetkega ning sellest ajahetkest alates hakkab toimuma ka füüsiline kulumine. Lisaks füüsilisele kulumile on kulumise komponendideks veel funktsionaalne ja majanduslik ehk keskkonna kulum (Joonis 1).

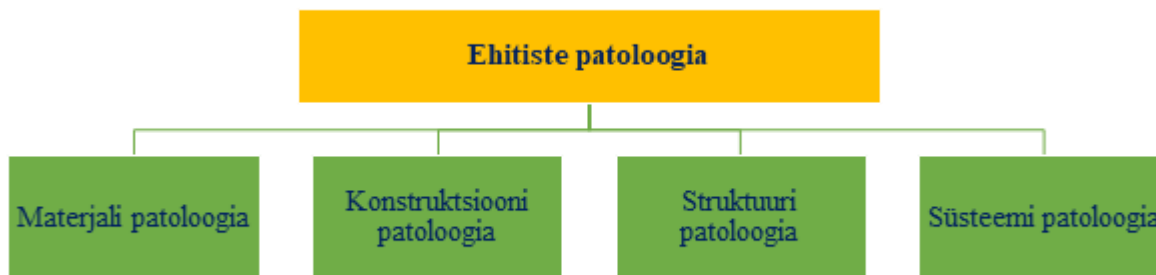
Joonis 1. Ehitise kulumid.



Juhul kui füüsiline kulumine vastab teatud etteantud, konkreetset hoonet või selle koostisosasid iseloomustavatele füüsilise kulumise määradele, on tegemist normatiivse füüsilise kulumiga. Nendel juhtudel kui hoone kui terviku või tema üksikute tarindite jm koostisosade füüsiline kulum on kiirem kui vastav normatiivse kulumise määr, saab arutleda füüsilise kulumise mittenormatiivse, ekstraordinaarse olemuse üle. Mittenormatiivne kulum, mis reeglina on alati suurem kui normatiivne kulumise määr, põhjustabki vajaduse erinevate ehitiste ja nende tarindite süsteemide seisukorra hinnanguks. Olukorda, kus ehitise ja tema üksikute koostiseks olevate tarindisüsteemi füüsiline kulum on ekstraordinaarne, nimetatakse ehitise haiguseks, markeeritakse kui ehitise patoloogilist seisundit ning uuritakse ehitise puhul haige ehitise sündroomi tekkimist ja selle sisu. Ehitise patoloogia nurgakiviks on Columbia ülikooli professori J.M. Fitch poolt 1970-date aastate alguses loodud lähenemine, mille *Chartered Institute of Building* (CIB) sõnastas 1993 aastal kui koosluse, kus on koos vaadeldavad järgmised ilmingud (*Building pathology...* 1993): a) ehitiste defektid, b) defektide põhjused, c) defektide tagajärjed ja d) defektide kõrvaldamine.

Tänases praktikas kasutatav ja erinevate uuringute aluseks olevas vormis on CIB lähenemise ümbersõnastanud Samuel Harris raamatus „*Building pathology: deterioration, diagnostics and intervention*“ (Harris 2001). Harris (2001) järgi on Kaarel Sahk Baasfinantseeritav uurimistöö P8003 lõpparuandes (2012) esitanud lähenemise, mis on kujutatud joonisel 2.

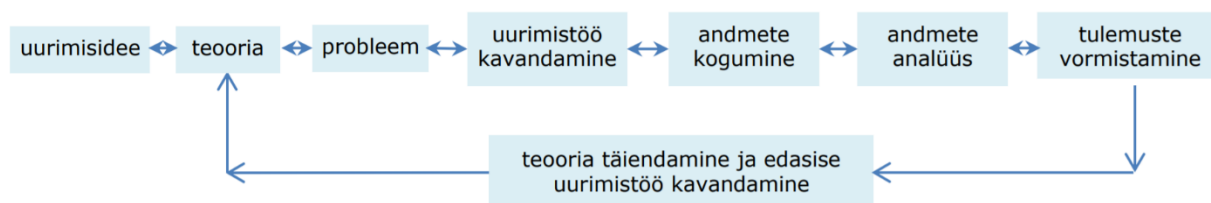
Joonis 2. Ehitise patoloogia taksonoomia. (Harris 2001)



Käesolev magistritöö on teoreetiline kirjanduse ülevaade, mille koostamiseks on kasutatud eesti- ja ingliskeelseid teadusartikleid ning Eesti Maaülikooli lõputöid. Teemakohaste artiklite otsimiseks kasutati järgmisi elektroonilisi teadusandmebaase: *EBSCOhost*, *ScienceDirect* ja otsingumootorit *Google Scholar*. Kirjandusallikate otsimisel ja valimisel teadusandmebaasidest seati järgmised piirangud: inglise või eesti keel, artikli kättesaadavus täistekstina ja avaldatus eelretsenseeritud teadusajakirjas. Töös on täiendavalt kasutatud kodulehti, avalikult kättesaadavaid õppematerjale, standardeid ja määruseid. Kasutatud on määrust EVS 837-1:2003 “Piirdetarindid. Osa 1: Üldnõuded“, mis kehtis kuni 06.11.2009. Kehtetut standardit on kasutatud, kuna selles on sõnastatud üldiseid piirdetarindite projekteerimise põhimõtteid, mida saab kasutada ka praegusel hetkel või tulevikus. Lisaks standardile EVS 837 on kasutatud kehtetuid määruseid, et võrrelda neid täna kehtivate määrustega ja tuua välja aja jooksul läbi viidud muudatused.

Teadusandmebaasidest saadud otsingutulemused vaadati üle esialgu pealkirjade järgi, eesmärgi või uurimisülesannetega sobivad artiklid salvestati ja lisati lõputöö portfooliosse. Hiljem tutvuti artiklite sisukokkuvõtetega, käsitleti sobivad, tõlgiti need vajadusel eesti keelde ning koostati temaatiliselt struktureeritud kirjanduse ülevaade. Temaatiliselt struktureeritud ülevaate loomiseks kasutati tsüklilist uurimisprotsessi mudelit (joonis 3), kus on võimalik igas uurimistöö koostamise etapis pöörduda tagasi eelmisesse etappi, et seda täiendada.

Joonis 3. Tsükliline uurimisprotsessi mudel. (Õunapuu 2014)



Kõik töös kasutatud allikad on viidatud tekstisisesele ja kajastatud allikate loetelus. Algallika mõtet on proovitud edasi anda mõtet muutmata ning tõlkimiseks on kasutatud inglise-eesti- ja inglise-elektronilisi sõnaraamatuid. Uurimistöö vormistamisel on võetud aluseks Eesti Maaülikooli kirjalike tööde vormistamise juhend. Inglisekeelsete allikate kasutamise tõttu on käesoleva lõputöö peamised probleemid seotud tõlkimise, allikate valiku ja korrektse teaduskeele kasutamisega. Paralleelselt uurimistöö koostamisega valmis lõputöö portfoolio, mis asub autori isiklikus arvutis ning sisaldab käesolevas töös kasutatud teadusartiklite täistekste.

Lõputöö autor leiab, et seisukorra hindamist sisaldavaid uurimistöid on Eesti Maaülikooli maaehituse erialal tehtud piisavalt, et kirjeldada ja võrrelda enamlevinud probleeme ja renoveerimislahendusi vanades hoonetes. Seni koostatud töödes on kasutatud nii visuaalset hindamist kui ka mõõtmiseseadmeid külmasildade ja õhulekkekohtade leidmiseks ning kandekonstruktsioonide ja niiskuskahjustuste tuvastamiseks. Eesti Maaülikoolis kaitstud lõputöös on oluline osa tehnilise seisukorra hindamisel, hõlmates tööde sisulisest osast enamuse. Renoveerimisvõimalusi pakkudes on piiratud enamlevinud lahendustega, mis on välja pakutud autorite enda poolt, kuid põhjendatud teaduslikku alust väljatoodud lahendustel ei ole.

Käesolev lõputöö on koostatud teadusandmebaasidest kättesaadavate teoreetiliste materjalide põhjal, võrdluseks on kasutatud ka Eesti Maaülikooli maaehituse eriala lõputöid, mis käsitlevad ehitiste tehnilist seisukorda ja vastavaid renoveerimislahendusi. Varasematel aastatel koostatud magistratöös on ehitusfüüsikaliste probleemide leidmiseks ja renoveerimislahenduste pakkumiseks kasutatud põhiliselt õppetöö ja praktika jooksul omandatud teadmisi. Käesolevas magistratöös on välja toodud nii Eesti Maaülikooli lõputööde autorite kui ka erialateadlaste poolt leitud tõendus põhiseid lahendusi.

2. PEAMISED SOOJUS- JA NIISKUSTEHNILISED PROBLEEMID PALK- JA PLOKKHOONETE PIIRDETARINDITEL

2.1 Soojus- ja niiskustehnilised probleemid palk- ja plokkhoonetel

Ruumi soojusliku mugavuse tagamiseks peavad piirded olema soojapidavad. Elamute välispiirete soojuslähivuse nõuded on välja toodud varem kehtinud EV määrustes "Energiaatõhususe miinimumnõuded" nr 258, nr 68 ja EV määruses „Hoone energiaatõhususe miinimumnõuded“ nr 55. Aastal 2008 jõustunud määruses nr 258 kehtestatud U-väärtused karmistusid 2013. aastal määrusega nr 68. Alates 01.07.2015 kuni 01.01.2019 kehtinud määruses nr 55 U-väärtused ei muutunud. Hetkel kehtivas määruses „Hoone energiaatõhususe miinimumnõuded“ nr 63 ei sätestata piirdetarinditele minimaalseid soojuslähivuse nõudeid. Hoonete piirdetarindite soojustakistuste ja -lähivuste arvutusmeetodid on välja toodud standardis EVS-EN ISO 6946:2017, EVS 908-1:2016, EVS-EN ISO 10456:2008, EV määruses „Hoone energiaatõhususe arvutamise metoodika“ nr 58. Arvestades seda, et 2050. aastaks peavad kõik elamud Euroopa Liidus olema liginullenergiahoonete nõuetele vastavad, siis võib juba täna U-arve vaadata KredExi juhendist (KredEx juhendmaterjal... 2017), kus on välja toodud soovituslikud väärtused liginullenergiahoonetele. (tabel 1).

Tabel 1. Piirdetarindite soojuslähivuse nõuete muutus ajas (EVS 837; EV määrus nr 258; EV määrus nr 68; EV määrus 55; KredEx juhendmaterjal... 2017)

Piirdetarind	Soojuslähivus W/(m ² ·K)			
	EVS 837	Määrus nr 258	Määrus nr 68 ja nr 55	KredEx juhend
Välissein	0,28	0,2-0,25	0,12-0,22	0,12-0,15*
Aken	2,1	0,7-1,4	0,6-1,1	0,8-0,9*
Katuslagi	0,22	0,15-0,2	0,1-0,15	0,07-0,10*
Pinnasel või tuuldud põrand	0,22	0,15-0,2	0,1-0,15	0,10-0,12*

Märkus. Tähis*** tähistab soovituslikke väärtuseid.

Kalamees jt (2011) uuritud tüüphoone 15 cm paksuse palkseina U-väärtused olid järgmised: $U_{välissein}=0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$, $U_{põrand}=0,56 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$ ja $U_{vahelagi}=0,46 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$. Vanadel hoonetel on U-arvud väiksemad, sest varem olid nõuded välispiirete soojapidavusele leebemad. Erinevate konstruktsioonidega hoonete soojapidavused suurel määral üksteisest ei erine, soojuslikke ebamugavusi tekitavad külmasillad ja õhulekked. Vanasti kasutati plokkidena peamiselt gaaskukeroon- ning gaassilikaltsiitplokke, mille soojuserijuhtivust pole täpselt teada, aga võib jääda samasse vahemikku tänapäevaste tehaseliste betoonplokkide vastavate näitajatega. Nimetatud plokke toodeti paksusega 200 mm ja seinte soojusjuhtivus võib jääda vahemikku $U_{välissein}=0,5-1,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$. Kalamees jt (2011) uuritud palkhoonete ja soojustamata plokkhoonete konstruktsioonide soojuslähivused ei vasta tänapäevaste energiatõhususe nõuetele.

Külmasillad on piirdetarindites esinevad kohad, kus soojusjuhtivus on suurem tarindi teistest osadest. Külmasillad jaotatakse geomeetrilisteks ja ehitustehnilisteks. Geomeetriliste külmasildade alla kuuluvad erinevad sõlmed ja nurgad, ehitustehnilisteks külmasildadeks on läbiviigud ja sidemed välispiiretes. Lisaks geomeetrilistele ja ehitustehnilistele külmasildadele võivad sisetemperatuuri lokaalset alanemist põhjustada vead õhutõkke ning soojustuse paigaldusel või soojustuse märgumisel. Külmas kliimas on oluline külmasildadega arvestada, kuna külmasillal oleva sisepinna temperatuuri langemisega kaasneb suhtelise niiskuse tõus. Alates 75% õhuniiskuse juures kaasneb oht hallituse kasvuks ja 100% õhuniiskuse saavutamisel kondenseerub vesi konstruktsiooni pinnal. Paljude külmasildade koral suureneb üldine hoone energiakulu ja väheneb elanike soojuslik mugavus tulenevalt ebasümmeetrilisest soojuskiirgusest. (Maaelamute sisekliima... 2011)

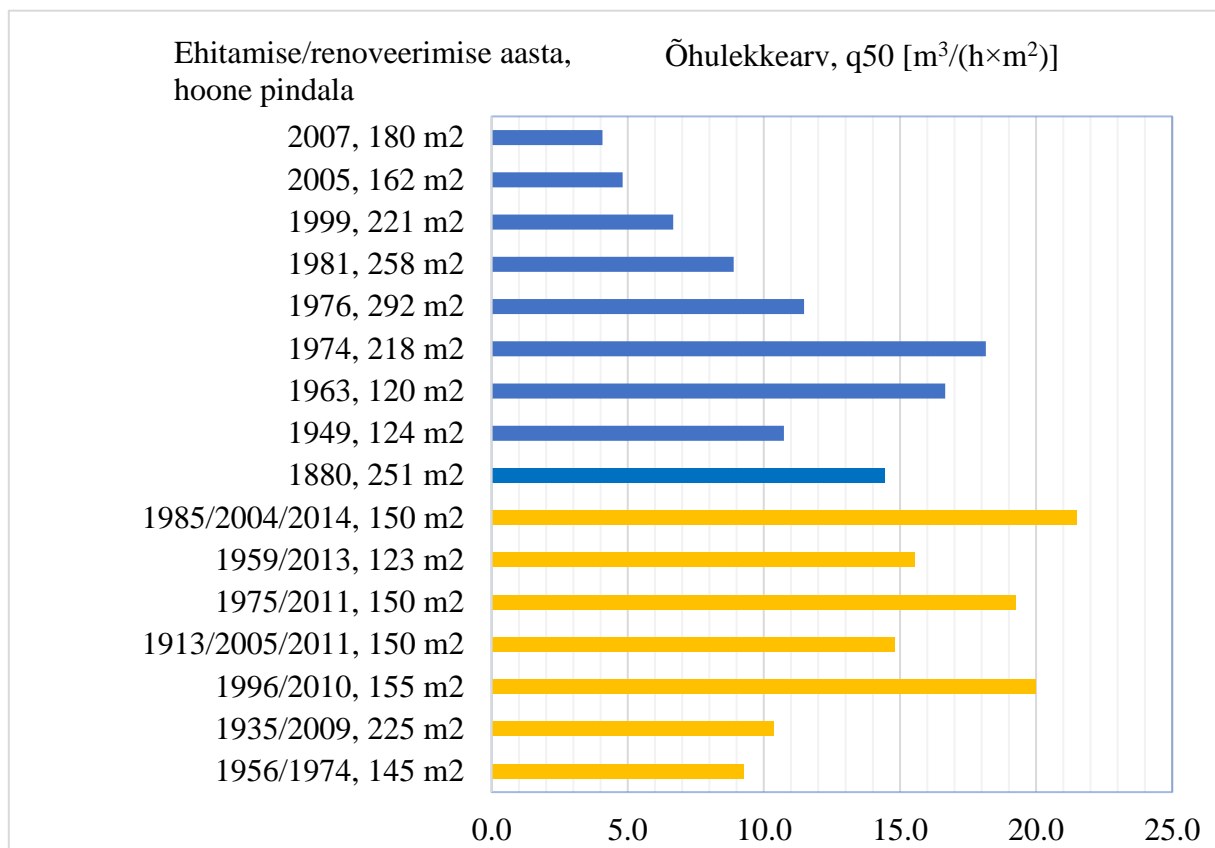
Sarnaselt külmasildadega põhjustavad sisetemperatuuri lokaalset alanemist ja sellega kaasnevaid probleeme õhulekked (Maaelamute sisekliima... 2011). Õhupidavus on oluline tigur hoone piirde soojapidavuse, energiatõhususe ja vastupidavuse saavutamisel ning mõjutab oluliselt sisekliima kvaliteeti (Vinha jt 2015; Van Linden, Van Den Bossche 2020). Välispiirete ebapiisavat õhupidavust ei saa pidada loomulikuks ventilatsiooniks, sest läbi ebatiheduste liikuvat õhu hulka ei saa kontrollida, reguleerida ega filtreerida (Kalamees s.a). Kuni aastani 2009 kehtinud Eesti standardis EVS 837-1:2003 “Piirdetarindid. Osa 1: Üldnõuded“ oli välja toodud, et piirde pinna keskmine infiltratsioonitegur ei tohi rõhuvahe 50 Pa puhul ületada

elamutes $3 \text{ m}^3/(\text{h}\times\text{m}^2)$ (EVS 837). Varem kehtinud Eesti Vabariigi määrustes nr 258 „Energiatõhususe miinimumnõuded“ (EV määrus nr. 258) ja nr 55 „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“ (EV määrus nr. 55) on määratud, et keskmine õhulekkearv ei tohi üldjuhul ületada $1 \text{ m}^3/(\text{h}\times\text{m}^2)$. Kehtivas määruses nr 63 „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“ pole välja toodud konkreetset piirangut õhulekkearvule, oluline on hoone summaarne energiatarbimine, millele õhupidavus mõju avaldab. Õhupidavuse parandamisel väheneb oht kondensatsiooniks ja vee imbumiseks konstruktsiooni ning säilivad soojustuse soojapidavad omadused (Van Linden, Van Den Bossche 2020), kuna tuule ligipääs soojustusele võib välispiirde U-väärtust tõsta kuni kuus korda (Nusser jt 2017).

Probleeme õhupidavusega tekitavad hoone vananemisel tekkinud praod ja ehitamisel tähelepanuta jäetud sõlmede õhutihedus (Chan jt 2013). Rebane ja Russak (2019) on leidnud, et palkhoone õhulekkearvuks on $28,93 \text{ m}^3/(\text{h}\times\text{m}^2)$. Kalamees jt (2011) leidsid palkhoonete uurimisel, et keskmiseks õhulekkearvuks on $15 \text{ m}^3/(\text{h}\times\text{m}^2)$. Taanis läbi viidud uuring (Mortensen, Bergsøe 2017) vanadest müüritishoonetest andis õhulekke väärtuseks 4-21,5 $\text{m}^3/(\text{h}\times\text{m}^2)$. Aastatel 2005-2007 ehitatud hooned vastasid Taanis 2006. aastal kehtinud õhupidavuse nõuetele, milleks oli $5,55 \text{ m}^3/(\text{h}\times\text{m}^2)$. Põhjaliku järelvalve ja korraliku tööde teostuse tulemusena on võimalik saavutada kaasaegsematele nõuetele vastav õhupidavus uutes hoonetes. Hoonetel, mis olid ehitatud 20. sajandil leiti õhulekkearvudeks rohkem kui $9 \text{ m}^3/(\text{h}\times\text{m}^2)$, olenemata sellest, et pooled neist olid renoveeritud. Õhulekkeid võib pidada tõsiseks probleemiks, kuna on leitud, et renoveeritud ja renoveerimata hoonete õhupidavus on sarnaselt madal (joonis 4). (Mortensen, Bergsøe 2017)

Van Linden ja Van Den Bossche (2020) on hulgaliste testimiste käigus leidnud, et aastatel 2006-2016 ehitatud hoonetes õhupidavus märgatavalt ei erine. Tulemuste mitte paranemine näitab, et teadmised õhupidavamate hoonete projekteerimisest ja ehitamisest ei käi kaasas karmistuvate energiatõhususnõuetega. Teiseks põhjuseks võib olla see, et projekteerijate teadmised täienevad ja materjalid

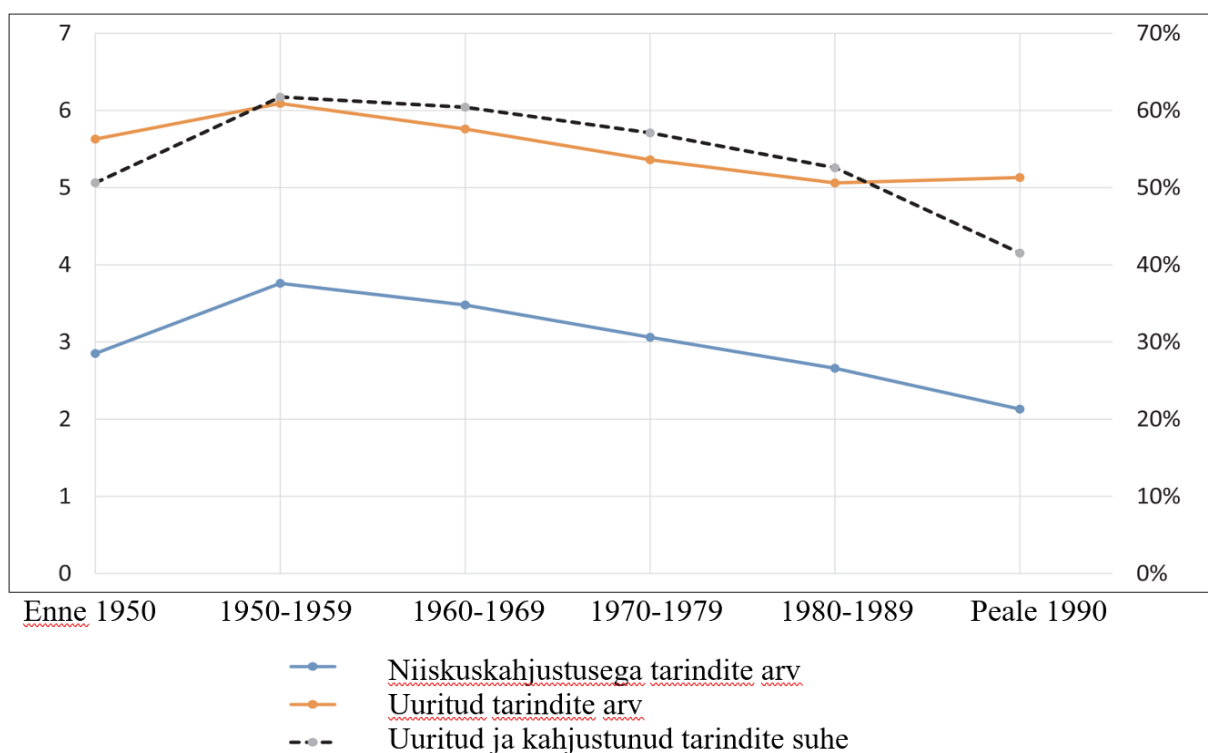
Joonis 4. Müüritishoonete õhulekkearv sõltuvalt ehitamise ja renoveerimise aastast. (Mortensen, Bergsøe 2017)



Poorsetes materjalides liigub vesi gaasilises ja vedelas olekus. Peamisteks niiskuse liikumise viisideks hoone piiretes on vee valgumine raskusjõu mõjul ja kapillaarne liikumine ning veeauru konvektsioon ja difusioon. Raskusjõu mõjul pääseb vesi läbi ebatiheduste konstruktsiooni ja võimaluseta välja kuivada tekitab piiretes mädanikku ja hallitust. Kapillaarsel teel liigub vesi materjali poorides pindpinevuse mõjul. Konvektsiooni korral liigub veeaur koos õhuga suurema õhurõhuga alalt väiksema õhurõhuga alale. Õhurõhu erinevusi tekitab temperatuuri erinevus, tuul või ventilatsioon. Veeauru difusiooni tekitab veeauru osarõhkude erinevus kahel pool piiret. (Kalamees 2016)

Niiskuse ja hallituse kahjustused esinevad tarindites lokaalselt, hõlmates kindlat piirkonda konstruktsiooni erinevatel osadel. Niiskuskahjustused esinevad hoonetel keskmiselt kolmes erinevas piirdetarindis, peale 1990. aastat ehitatud hoonetel kahes piirdetarindis. Niiskusest põhjustatud kahjustusi esineb rohkem vanemates hoonetes (joonis 5), ning on leitud, et vähemalt 40% hoone osadest, olenemata ehitusaastast, on niiskuskahjustustega. (Annala jt 2018)

Joonis 5. Niiskuskahjustusega ja kõigi tarindite suhe. (Annala jt 2018)



Põhiliselt esinevad niiskuskahjustused ruumides, mida kasutatakse harvem ja millel on kõrgem niiskuskoormus, nagu keldrid, soojustamata pööningud, vannitoad ja tuulutusruum põrandate all (Beckher jt 2017). Niiskusprobleemide ja hallituse esinemine on ülemaailmseks probleemiks (tabel 2) ning ei sõltu kliimast ja hoone kasutusotstarbest (Annala jt 2018).

Tabel 2. Hallituse ja niiskuskahjustuste levik (Annala jt 2018)

Viide	Uuritud hoonete hulk	Tulemus
Howden-Chapman jt 2005	613 eluhoonet Uus-Meremaal	hallitust ühes või mitmes ruumis on märganud 35% elanikest
Haas jt 2007	66 eluhoonet Austrias	lähemal uurimisel leiti hallituse kasvu 56% korteritest
Salonen jt 2007	77 büroohoonet Soomes	kogenud ehitusinsenerid leidsid niiskust või nähtavat hallitust 44% hoonetes
Becher jt 2017	205 elamut Norras	pädevad isikud leidsid indikaatoreid niiskusprobleemidest 50% hoonetes
Haverinen-Shaughnessy jt 2012	59 kooli Soomes, 85 Hispaanias ja 92 Hollandis	märke niiskusest ja hallitusest leiti 24% Soomes, 47% Hispaanias ja 43% Hollandis

Niiskuskahjustused mõjutavad konstruktsioonide vastupidavust ja põhjustavad siseõhu kvaliteedi langust. Niisketes konstruktsioonides arenevad mikroobid, mis levivad hoone siseõhku ja tekitavad elanikele terviseprobleeme. (Annala jt 2017) Soojustuse märgumisel väheneb soojusisolatsiooni soojustakistus, mille tõttu tekivad külmasillad ja oht niiskuse kondenseerumiseks süveneb veelgi.

2.1.1 Vundamendid

Eelmisel sajandil kasutati peamisteks materjalideks vundamendi rajamisel maa- ja paekive ning kivist betooni. Kivist ehk puttbetooni lisati betoonimise ajal looduslikke kive, umbes 40% kivist betooni mahust. Vundamentidega seotud peamisteks ehitusfüüsikalisteks probleemideks on vihmavee seisma jäämine sokli ülemises ääres ja liiga madal sokkel, mistõttu vihmavesi pritsib fassaadile ja esimesed palgiredad märguvad (Maaelamute sisekliima... 2011; Rebane, Russak 2019). Sokli ülemisele äärelle jääb vesi seisma puuduva või puuduliku veelaua tõttu (Rebane, Russak 2019). Esimese palgirea märgumist soodustab lisaks vihmaveele vundamendist tõusev niiskus. Palgirea lõplik läbimädanemine võib kaasa tuua välisseina vajumise. Märja sokli ja vale krohvi kasutamise korral laguneb krohv sokli pinnal. (Maaelamute sisekliima... 2011)

Esimese palgirea mädanemist ja teiste maapealsete kandekonstruktsioonide ning isolatsioonikihtide kahjustusi soodustab puudulik hüdroisolatsioon sein ja vundamendi vahel või ebasobivate niiskusisolatsioonimaterjalide kasutamine (Alev 2017; Vinha jt 2015). Hüdroisolatsioon kaitseb maapealset tarindit vundamendist tõusva kapillaarniiskuse eest. Vee kapillaartõusust tulenevad probleemid on aktuaalsemad vanade hoonete puhul, sest vanadel hoonetel puudub hüdroisolatsioon niiskuse kapillaartõusu takistamiseks ja kapillaartõusu protsess on pikaajaline (Lubelli jt 2018). Praktikas võib vesi tellis- ja kivimüüritistes mööda seinat tõusta ühe või kahe meetrini, sõltuvalt kasutatud materjalidest, põhjavee tasemest, soolade olemasolust ja võimalusest seinast välja aurustuda (Frössel 2006; Franzoni 2014; Lubelli jt 2018). Lisaks ebameeldivale sisekliimale, mis on tekkinud niiskuse jõudmisest seintele, põhjustab niiskus vundamendi müüritise tugevusomaduste vähenemist ja seinte soojusjuhtivuse tõusu (Lubelli jt 2018; Sardella jt 2018).

Vundamendi kapillaarides tõusnud vesi väljub soklil välja- ja sissepoole. Koos veega tõusnud soolad kristalliseeruvad sokli pinnal või seda katva krohvi all, tekib täiendav koormus, põhjustades krohvide lagunemist (Lubelli jt 2018). Kristallatsioonisurve võib tekkida ka kuival, harva niiskul soklil. Soolad reageerivad ka müüritises oleva mördiga, mis põhjustab mördi väljauhtumise. Rebane ja Russak (2019) on soklis nähtavate tühimike ja pragude esinemist põhjendanud iga-aastaste külmakergetega.

Soklini jõuab vesi sademete ja lumesulaveega, vundamendini maapinnas asuva vee kaudu. Pinnases esineva vee mõju vundamendile sõltub pinnase omadustest, mida on oluline arvestada uue hoone ehitamisel ja olemasoleva hoone renoveerimisel. Hoonet ümbritsevat pinnast või täidet on võimalik välja vahetada sobivama vastu (Pallin, Kehrer 2013). Vesi mõjutab vundamenti pinnaseniiskusega, mittesurvelise või surveveena. Pinnaseniiskus esineb hoone ümber vett mittesiduva ja hästi läbilaskva pinnase korral. Mittesurveline vesi ümbritseb vundamenti, kui hoone ümber on vettsiduv pinnas, aga rajatud on drenaaž ja tagasitäide on täidetud dreniivmaterjaliga. Surveline vesi mõjub vundamendile juhul, kui hoone ümber on vettsiduv pinnas ja drenaaži ei ole rajatud (Vee mõju... s.a). Kõigil juhtudel puutub vundament kokku niiskusega ja ilma hüdroisoleerimata kuiva vundamenti saavutada pole võimalik. Keldriga hoonete puhul tuleb arvestada ka vundamendile seestpoolt mõjuvate niiskuskooormustega.

2.1.2 Põrandad

Keldrita hoonete põrandakonstruktsioonid võivad olla pinnasele toetunud või pinnasest õhkvahega eraldatud (Masso 1990). Probleeme esineb esimese korruse põrandaaluse tuulduva ruumi soojus- ja niiskustehniliste tingimuste osas (Maaelamute sisekliima... 2011). Peamised esimese korruse põranda kahjustused ja puudused on põrandakonstruktsioonide mädanikkahjustused ja mikrobioloogiline kasv (Maaelamute sisekliima... 2011; Rebane, Russak 2019). Liigse niiskuse kogunemist põrandaalusesse ruumi soodustab puudulik õhuvahetus, mis on tingitud suletud tuulutussavadest, ning sademeveest või kõrge pinnasevee tasemest põranda alla tekkinud vesi (Alev 2017). Põrandaaluste õhuavad võivad olla sulgunud põrandate soojustamise, avade sulgemise või vundamendi remontimisel tuulutussavade kinni müürimise tõttu. Rebane ja Russak (2019) on uuritud palkhoones leidnud, et mitmed põrandatalad ja

põrandalauad on mädanikkahjustustega, sest puudulikust õhuvahetusest on põrandaalune ruum niiske ja talad toetuvad otse pinnasele. Alt tuulduvad põrandad on külmad ja tuulutusavade sulgemisega tõstetakse põrandapinna temperatuuri, kuid samal ajal ei tuuldu välja sinna sattunud niiskus, mis hakkab kondenseeruma (Maaelamute sisekliima... 2011; Alev 2017).

Soojustamata ja niiskuse eest isoleerimata pinnasel põrandate puhul ohustab niiskus konstruktsioone ja sisekliimat. Pinnasele toetuv põrand ehitatakse tihendatud täitele valatud betoonist, millele toetatakse põrandalaagid, või uputatakse laagid tihendatud liiva või kruusa vahele (Masso 1990). Kapillaarniiskus liigub vähesel määral ka läbi jämedateraliste täitematerjalide nagu liiv, kruus ja killustik, sest peeneteralisi osakesi leidub ka nendes materjalides. Materjal laseb läbi seda rohkem kapillaarniiskust, mida suuremad on poorid materjali osakeste vahel. Kapillaartõusuga täitematerjali ülemisse osasse jõudnud vee maht on väga madal, kuid piisav, et hoida suhteline õhuniiskus põrandaplaadi ja täitematerjali vahel kõrge. Täitematerjalid pinnasel põranda all on niisked aastaringselt, materjali relatiivne niiskus on 100% lähedal. (Rantala, Leivo 2008)

Kõrget niiskusesisaldust põrandaalustes kihtides ei saa pidada mittefunktsioneeriva drenaaži või kapillaarniiskust tõkestavate kihtide puuduseks, vaid loomulikuks tingimuseks niiske pinnasega kokkupuutes olevas konstruktsioonis (Rantala, Leivo 2008). Annila jt (2018) on leidnud, et Soomes esineb kõigist hoone tarinditest enim niiskuskahjustusi esimese korruse põrandates – 85% kõigis tuulduvates põrandates ja 82% pinnasel põrandates. Rantala ja Leivo (2008) leidsid, et betoonpõranda aluses pinnases on kõrge mikroobide sisaldus, kuid niiskusest tulenevaid kahjustusi ei esine.

Põranda all olevates täitematerjalides loovad soodsa keskkonna mikroobide kasvuks sooja toa poolt jahedamasse pinnasesse liikuv soojus ja pinnasest tõusev niiskus. Mikroobid levivad eluruumidesse, kui põranda ja seina vaheline liide pole piisavalt õhupidav (Rantala, Leivo 2008). Pinnasel betoonpõrandaga hoonetel on kuni 24% väiksem õhuleke kui põrandaaluse ruumiga hoonetel (Chan jt 2013). Vinha jt (2015) on leidnud, et pinnasel põranda või õhutusruumiga põrandate õhupidavuse vahe on marginaalne, kuid betoonist ja müüritisest hoonete põrandad on tunduvalt õhupidavamad kui puidust majade põrandad (tabel 3).

Tabel 3. Õhulekke väärtused erinevate pörandate korral (Vinha jt 2015)

Hoone konstruktsioon	Keskmine q50 väärtus m ³ /(h×m ²)		
	pörand pinnasel	tuuldud betoonist pörand	tuuldud puidust pörand
Betoon ja müüritis	10,0	9,6	-
Puit	15,5	15,9	15,9

Termografeerimisel on vundamendi ja pörandi liitekohas näha külmasildu kogu perimeetri ulatuses. Võrreldes teiste külmasildadega kogu hoones, olid kõige märgatavamad ebatihedused sein ja pörandi liites (Bjarlöv, Vladyková 2011; Rebane, Russak 2019; Domhagen, Wahlgren 2017). Rebane ja Russak (2019) leidsid, et passiivses olukorras, ilma alarõhutestita, asuvad kõige kriitilisemad külmasillad pörandi ja sein liitekohtades. Kõigist tuvastatud õhuleketest 13% esinesid pörandi ja välisseina liites, kus domineerisid ka suurest piirde soojusjuhtivusest tingitud külmasillad, mis tekivad siis, kui betoonpörand on valatud vastu vundamenti. Soojustamata pörandi ja vundamendi korral väljub vundamendi kaudu märgatav hulk soojust. (Maaelamute sisekliima... 2011)

2.1.3 Seinad

Välisseinte probleemid on seotud vähese soojapidavusega, suure niiskuskooormusega, õhuleketega ja ehitustööde kehva kvaliteediga. Välisseintele avaldub suur niiskuskooormus põhiliselt sademete sattumisel fassaadile puuduliku sademevee eemale juhtimise tõttu (Maaelamute sisekliima... 2011; Rebane, Russak 2019). Puudulik sademevee eemale juhtimine tuleneb näiteks lühikesest räästast, puudulikust vihmaveesüsteemist ja liidete ebatihedusest. Kõige sagedamini on palkmajade puhul kahjustunud aknaalused palgid, sest puudusi esineb avatäidete ja välisseina liitekohtades ning aknaplekkides. Mädaniku esinemist ülejäänud seinal põhjustavad kaldvihm või räästa vigade tõttu seinalle sattuv vesi, mis hoone varjuküljel või lähedal kasvava taimestiku tõttu ei kuiva piisavalt kiiresti. (Maaelamute sisekliima... 2011) Rebane ja Russak (2019) on leidnud, et seinalle põhjustab niiskuskahjustusi puuduv vihmaveesüsteem, mistõttu jookseb vesi katuselt seinalle või pritsib veelaualt seinalle.

Niiskus pääseb konstruktsiooni ka difusiooni ja konvektsiooni kaudu siseruumidest. Konvektsiooni korral liigub veeaur koos õhuga suurema õhurõhuga alalt väiksema õhurõhuga alale. Veeauru difusiooni tekitab veeauru osarõhkude erinevus kahel pool piiret. (Kalamees

2016) Difusioonist tulenevaid niiskuskahjustusi saab vältida konstruktsiooni sattunud niiskuse välja tuulumisega või difusiooni takistamisega aurutihedate materjalidega. Vanemates hoonetes liigub niiskus konvektsiooniga, sest välispiirded on ebatihedad ja difundeerunud niiskus tuuldub kiiresti välja. Probleeme tekitavad aurutihedad materjalid hoone välisküljel, mis takistavad niiskuse välja tuulumist. Vanadel hoonetel on laudise all kasutatud bituumenkatet, mis välisseina välisküljele niiskustehniliselt ei sobi, sest bituumen on aurutihe. Suure tõenäosusega on bituumenkate aja jooksul purunenud ning niiskus sinna alla ei kogune. Seinal katki läinud ja lahti tulnud bituumenkate võib sulgeda laudise taguse õhuvahe, mis takistab niiskuse välja tuulumist (Alev 2017). Rebane ja Russak (2019) pole leidnud, et hoonesisene niiskuskoormus seina konstruktsioone kahjustanud oleks.

Õhulekked seintes mõjutavad hoone õhutihedust kõige enam, kuna seinte kogupindala on kõigist hoone osadest suurim, mistõttu esineb õhulekkeid rohkem (Van Linden, Van Den Bossche 2020). Õhutiheduse parandamiseks on palkhoonete varasid tihendatud taku, sambla ja mineraalvillaga, lisaks on leitud, et häid tulemusi annab ka krohvi või vineeri kasutamine seina sisepinnal. Keskmiselt kaks korda väiksema õhulekkega olid elamud, mis olid seestpoolt krohvitud või tihedalt vineeriga kaetud (Maaelamute sisekliima... 2011). Õhulekete suurenemise vältimiseks tuleb seinast või laest puitplaati või krohvi eemaldades see asendada (Rebane, Russak 2019). Vanemates hoonetes on seinu kaetud veel ka tapeedi, soome papi ja kipsiga, mis parandavad seinte õhupidavust (Rebane, Russak 2019; Vinha jt 2015). Oluline mõju õhupidavusele on sisemist palgi pinda katval sisemisel krohvikihil, mille eemaldamisel sagenevad õhulekked läbi seina (Alev 2017). Peamiseks külmasildade tekkepõhjuseks palkhoonete seintel on ebakorrektned palkide ja sõlmede tihendamine. Alarõhu tingimustes on suurimad õhulekked välisseinte nurkades ja vanade akende ümbruses (Rebane, Russak 2019). Palkmaja nurkades on tapid tehtud suurema varuga ja nende vajumine on ebaühtlasem kui mujal seinas, tekitades sellega olulise õhulekkekoha palkmajas (Maaelamute sisekliima... 2011).

Palkhoonetel on madalam õhupidavus kui plokkhoonetel (tabel 4), sõltudes suuresti sellest, millega on palgi varasid tihendatud. Kaasaegsed materjalid nagu vahtkumm või paisuvad tihendid annavad paremaid tulemusi kui mineraalvill, lina või takk. Kvaliteetselt ehitades on võimalik kõikide konstruktsioonide puhul saavutada hea õhupidavus, olenemata hoone vanusest ja kasutatud soojustus- ja õhutõkkematerjalidest (Vinha jt 2015). Kehvema ehituskvaliteedi

Tabel 4. Õhulekkearv erinevate konstruktsioonidega hoonetes (Vinha jt 2015)

Konstruktsiooni-materjal	Ühekordne hoone		Kahekordne hoone	
	uuritud hoonete arv	keskmise q50 väärtus $\text{m}^3/(\text{h}\times\text{m}^2)$	uuritud hoonete arv	keskmise q50 väärtus $\text{m}^3/(\text{h}\times\text{m}^2)$
1. Poorbetoonplokk	3	6,66	7	5,93
2. Õõnesplokk	2	8,15	8	6,66
3. Palk	8	22,2	12	20,74

Palkhoonete õhupidavus muutub aastaringelt 10-25%, talvel väheneb õhupidavus seoses puidu kahanemisega, suvel seevastu paraneb (Domhagen, Wahlgren 2017). Domhagen ja Wahlgren (2017) tehtud katsed näitasid, et pärast kaheksat päeva katsekonstruktsiooni hoidmist 90% õhuniiskuse juures vähenesid õhulekked 40% võrra. Pärast kaheksat päeva lasti õhuniiskus tagasi 25% lähedale ja järgmise kaheksa päevaga kasvasid õhulekked tagasi katsega alustamise tasemele (Domhagen, Wahlgren 2017). Niiskus ei tõuse toas kunagi stabiilselt 90%-ni ja ka langemine 25% peale on lühiajaline, mistõttu ei tekita reaalses õhus puidu paisumine ja kahanemine nii suuri muutusi. Termograafia ja alarõhutestid näitasid, et palju lekkeid esineb välispiirete läbistustes nagu pistikupesade, torude ja korstnate ümbruses. Renoveerimise käigus võivad pistikupesad olla süvistatud välisseinapalkidesse, nendes kohtades on näha olulisi õhulekkeid. Analoogsed õhulekked tekivad süvistatavate laelampide kasutamisel.

Soojapidavuse parandamiseks on hooneid soojustatud seestpoolt mineraalvillaga või krohvitud roomatiga, millega kaasnevad riskid hallituse kasvuks või veeauru kondenseerumiseks (Maaelamute sisekliima... 2011). Termografeerimised näitavad, et hoone välisseinte pinnatemperatuurid on ebaühtlased ja vajavad lisasoojustust (Maaelamute sisekliima... 2011; Rebane, Russak 2019). Olulised külmasillad on kõigil hoonetel seotud läbistuste ja sõlmede tihendamisega. Palksein on teiste massiivseintega võrreldes ainulaadne, sest sügavate pikisuunaliste pragude tekkimine on puidu kuivamise tõttu peaaegu vältimatu. Pragudel on sein õhupidavusele oluline mõju, kuna nende täielik sulgemine on keeruline.

2.1.4 Avatäited

Palkhoonete akende alused palgid on sageli kahjustunud puuduliku või vigase vee ära juhtimise tõttu, kuna vesi võib voolata aknalt seinale (Alev 2017). Rebane ja Russak (2019) on palkhoone seisukorra hindamise käigus leidnud, et akende veeplekkide puudumise tõttu on akende alused

palgid liigniiskuse tõttu kahjustunud. Aknaraamide kahjustuste peamisteks põhjusteks on väline kliimakoormus, hoolduse puudus ja kasutusest tulenev amortiseerumine. Olulisi puudusi leiti akende tihendustes, puudu olid tihendid aknalengide ja tenderpostide vahel, raamid olid kuivanud ja pragunenud ning vanad aknad polnud nii tihedad kui tänapäevased.

Olulised geomeetrilised külmasillad ja peamised õhulekkekohad paiknevad avatäidete ja välisseina liitumiskohas, kuna lengi ja seina vahelised liited on puudulikult tihendatud, lengid õhukesed ja aknad sageli ühe raamiga. Kahe raamiga ja ~15 cm paksuse lengiga uute puitakende juures külmasilda ei esine. (Maaelamute sisekliima... 2011) Akende energiatõhususe juures on oluline aknaraami ja klaaspaketi soojapidavus, seina/tenderposti ja lengi vahelise osa õhupidavus. Soojapidavus ühe klaasiga vanadel akendel on 4,8 W/(m²×K), vanadel ustel 3,6-4,0 W/(m²×K) (Gillott jt 2016) ning tüüpilisel topelt klaasiga puitaknal on 2,5-3,0 W/(m²×K) (Kalamees jt 2017b).

Õhulekked on oluliseks energiakadu soodustavaks teguriks, eriti vanemate ja ebakvaliteetselt paigaldatud ja tihendatud akende puhul. Kõigist hoone õhuleketest esineb 15-27% akende ebatiheduste tõttu (Van Den Bossche, Janssens 2016; Maaelamute sisekliima... 2011). Akna nurgelisus ja asukoht seina suhtes muudab akende ja seina vahelise liite teipimise võrreldes tasapinnaliste pindadega keeruliseks (Van Linden, Van Den Bossche 2020). Ebatiheduste tõttu liigub siseõhk takistamatult lengi vahele ja niiskuse kondenseerumine on vältimatu. Kõrge niiskussisaldus soodustab mädaniku teket puitosadele ja loob hallituse kasvuks sobilikud tingimused plastakendel. Uksed on enamasti piisava õhutihedusega, kuid tihti puuduvad ukse ja lengi vahelised tihendid (Maaelamute sisekliima... 2011)

2.1.5 Vahelaed

Termografeerimiste tulemused näitavad suurt soojuskadu vahelae ja seinä liitumiskohas (Rebane, Russak 2019; Maaelamute sisekliima... 2011). Erinevates uurimistöödes on välja toodud, et palk- ja plokkhoonetes on suurimate õhuleketega piirkonnaks seinä ja vahelae liide (Maaelamute sisekliima... 2011; Vinha jt 2015; Bjarlöv, Vladyková 2011). Vahelae ja seinä liite õhupidavus sõltub vahelae kandekonstruktsioonide ehituseks kasutatud materjalist. Vinha jt 2015 on leidnud, et betoonplokkidest hoone puitkarkassist ja betoonist vahelae ja seinä sõlmede õhupidavus erineb 20% võrra. Talade ümbert on keeruline liidet tihendada, mis muudab puitkarkassist vahelae vähem õhupidavaks, mistõttu muutub oluliseks tihendustööde kvaliteet (Vinha jt 2015). Elamutes, kus soojustuseks on saepuru, hein või ainult mineraalvill, on lae õhupidavus väike. Vanematest soojustusmaterjalidest on mõnevõrra parema õhupidavusega savi. Kõige väiksema õhupidavusega on kattelaudisega laed, kuna laudise vahesid ei ole puidu kahanemise ja paisumise tõttu võimalik saada õhutihedaks. Lagede viimistlemiseks kasutatud vineer või krohv suurendab oluliselt lae õhupidavust. (Alev 2017)

Korstna ümber esinevad suured soojuskaod, kuna korstna läbiviigud vahelaest on sageli puudulikult tihendatud. Ebatihedalt või valesti tihendatud korstnaümbrused põhjustavad ka tuleohutusega seotud probleeme. (Maaelamute sisekliima... 2011) Õhulekkeid täheldatakse lisaks ustele ja akendele ka vahelae pööninguluukide ümbruses (Mortensen, Bergsøe 2017) ja ventilatsioonitorude läbiviikudes (Bracke jt 2014). Õhupidavust saab märgatavalt parandada tihendades läbiviike välispiiretest, kusjuures ühe läbiviigu tihendamine parandas kogu hoone õhupidavust 6% võrra (Bracke jt 2014).

Vanemate elamute ehitamise ajal lisati lae peale soojustuseks liiva, saepuru, linaluud, heinu ja nende segusid savi või lubjaga. Vanad soojustusmaterjalid ei taga tänapäevastele vajadustele vastavat soojatakistust, kuna soojustuskihi paksus on õhuke (10-20 cm) ja soojuseri juhtivus on kõrgem kui tänapäeval kasutuses olevatel soojustusmaterjalidel. (Maaelamute sisekliima... 2011) Vanade hoonete pööningutel on relatiivne õhuniiskus madal ja puudub hallitus ka sellisel juhul, kui katustel on probleeme läbitilkumisega, kuna vahelaed on kõrge soojajuhtivusega ja pööningud seetõttu soojad (Alev 2017).

3. SOOJUS- JA NIISKUSTEHNILISTE PROBLEEMIDEGA PALK- JA PLOKKHOONETE RENOVEERIMINE

3.1 Hoonete renoveerimine

Hoonete renoveerimisega püütakse saavutada mugavam sisekliima, modernsem elukeskkond ja parem energiatõhusus, mis vastaks kehtivatele nõuetele. Hooneid tuleb pidevalt hooldada, aga pidevalt kallinevate energiahindade või elanike elutingimuste muutmise soovi tõttu tuleb ette võtta ka renoveerimisi. Renoveerimistööd on tihti kulukad ja seetõttu tuleks teostada töid, mis mõjutavad hoone funktsiooni paranemist soovitud tulemuseni kõige enam. Vanade hoonete renoveerimisel on alati mitmeid lahendusi, millest igal on omad riskid ja täiesti õiget lahendust otsida ei tasu.

Peamised hoone suurenenud energiakulu põhjused on soojuskaod läbi välispiirete ja ebaefektiivne küttesüsteem. Välisseinale isolatsiooni lisamine on töömahukas, kuid see on soojuskadude vähendamisel ja hoone õhutiheduse suurendamisel kõige tõhusam. (Kalamees jt 2017b) Karmistuvaid energiatõhususe nõudeid arvestades ei piisa enam ainult hoone soojustamisest, vaja on kompleksemat lähenemist. Vanade hoonete renoveerimisega kaasnev välispiirete soojustamine parandab küll piirete arvutuslikku soojusjuhtivust, kuid sama oluline on parandada ka õhupidavust. Ehitusfüüsikalisi probleeme uurides selgub, et kirjandusallikates on palju kirjeldatud õhulekkeid piiretes ja sõlmedes, seega soojustusega koos peaks toimuma ka õhulekete likvideerimine. Läbi tihedate piirete ei toimu piisavat õhuvahetust ning õhu sissepääsuks on vaja spetsiaalseid avasid ja sundventilatsiooni (Masso 2016) või soovitatavalt soojustagastusega ventilatsiooni (Kalamees jt 2017b). Alev jt (2014) on leidnud, et tehnosüsteemide (küte ja ventilatsioon) uuendamine parandab hoone energiatõhusust oluliselt, kuid käesolevas lõputöös tehnosüsteemide renoveerimist põhjalikumalt ei käsitleta. Enne hoone renoveerimise alustamist peab esmalt likvideerima puudused, mis mõjutavad otseselt hoone eluiga ja kasutuskõlblikkust. Niiskuskahjustustega hoones on esmatähtis likvideerida niiskuskahjustuste põhjused ja seejärel liikuda edasi energiatõhususe parandamise poole.

Sõltumata renoveerimise täpsest eesmärgist peab järgima renoveerimist käsitlevaid määrusi. Vastavalt ehitusseadustikule (Ehitusseadustik 2015, § 65 lg 1), peavad uued ja oluliselt rekonstrueeritavad hooned vastama energiatõhususe miinimumnõuetele, mis on reguleeritud läbi Majandus- ja Kommunikatsiooniministeeriumi ministri vastava määruse "Hoone energiatõhususe miinimumnõuded" (Määrus 63). Eestis kehtivate "Hoonete energiatõhususe miinimumnõuded" ja "Nõuded energiamärgise andmisele ja energiamärgisele" määruste järgi peavad oluliselt rekonstrueeritavate hoonete energiatõhususarvu väärtused vastama vähemalt C energiatõhususarvu klassile (EV määrus nr 36; EV määrus nr 63). Oluline rekonstrueerimine on ehitamine, millega seotud kulud hoone tarindite või tehnosüsteemide muutmiseks või asendamiseks on rohkem kui üks neljandik samaväärse hoone keskmise ehitusmaksumuse väärtusest (Ehitusseadustik 2015, § 63 lg 4). Energiatõhususe miinimumnõudeid uuendatakse vähemalt korra viie aasta jooksul, arvestades tehnilist arengut. (Ehitusseadustik 2015, § 65 lg 3)

Euroopa Liidus reguleerib hoonete energiatõhusust 2010. aasta direktiiv "Euroopa Parlamendi ja nõukogu direktiiv 2010/31/EL, hoonete energiatõhususe kohta". Direktiivis tuuakse välja pikaajaline eesmärk, milleks on väga energiatõhusa ja vähese CO₂ heitega hoonefondi saavutamine aastaks 2050. Eesmärgi täitmiseks peab iga liikmesriik koostama pikaajalise strateegia elamu- ja mitteeluhoonete renoveerimiseks kogu riigis, et hõlbustada olemasolevate hoonete ümberehitamist liginullenergiahooneteks. Lähtudes direktiivis esitatud nõudmistest, määravad riigid miinimumnõuded rekonstrueeritavate hoonete energiatõhususele. (EU direktiiv 2010 L153/13).

Hetkel peab Eestis oluliselt rekonstrueeritav hoone saavutama energiatõhususklassi C, kuid otstarbekam oleks renoveerimise kavandamisel juhinduda Euroopa Liidu 2050. aasta energiatõhususe eesmärgist ja rekonstrueerida hoone arvestades liginullenergiahoone ehk energiatõhususklass A nõuetega. Otstarbekam on valida sellised soojustuslahendid ja lisasüsteemid, millega tagatakse piisav energiatõhusus, et enne aastat 2050 ei tekiks vajadust hoonet uuesti renoveerida.

3.1.1 Vundamendid

Vundamendi konstrueerimisel on oluline, et maapinna niiskus ja vesi maapinnal või pinnases ei pääseks piirdetarindisse (EVS 837). Enamlevinud meetodid on vundamendi maapealsetest tarinditest hüdroisolatsiooniga eraldamine, vundamendi hüdroisoleerimine ning drenaaži ehitamine (Franzoni 2018). Kapillaartõusust tingitud niiskuse isoleerimine vanas hoones on äärmiselt keeruline ning puudu on usaldusväärsetest lahendustest. Olemasolevate hoonete vundamentide ja soklite katmine hüdroisolatsiooniga on äärmiselt ebasobiv, kui niiskuse sissetungi ei likvideerita täielikult. Sokli katmisel hüdroisolatsiooniga väheneb pind, millelt aurustuda ja kapillaarniiskus võib tõusta kõrgemale (Franzoni 2014).

Maapealsed tarindid tuleb vundamendist eraldada kapillaarniiskust tõkestava hüdroisolatsiooniga (EVS 837). Palkhoonetel saab hüdroisolatsiooni vundamendi ja välisseina vahele paigaldada esimese rea palkide vahetuse käigus, kui seda pole tehtud hoone ehitamise käigus või vana on kulunud (Maaelamute sisekliima... 2011). Plokkhoonetele pole võimalik hüdroisolatsiooni paigaldada palkhoonetele sarnase tehnoloogiaga. Palkhoonet on võimalik kergitada tungidega, kuid plokkhoone korral tuleb valida keerukamate variantide vahel.

Kemikaalide pindinjekteerimisega horisontaalse niiskustõkke tekitamine on üks meetoditest, mida vundamendi renoveerimistöodel kapillaarniiskuse tõkestamiseks kasutatakse. Injekteerimisel puuritakse vundamenti 10-20 cm sammuga augud $\frac{3}{4}$ seinä sügavusele, mis täidetakse injekteerimisvaiguga. Injekteerimise tõhusus sõltub paljudest muutujatest nagu veega küllastumisaste, mördi/kivi liited, ehitusmaterjalide varieeruvus ja omadused, pH tase müüritises, pragude ja tühimike olemasolu seinas, injekteermise tehnoloogia. Injekteerimise tulemused on ettearvamatud, sest enamikke muutajaid (müüri küllastuvus veega, vanade materjalide omadused, pH tase, injektsioonitehnika) on reaalsuses raske kontrollida (Franzoni 2014). Injekteerimise tulemusel kapillaarniiskuse tõus aeglustub, kuid täielikku vee liikumise peatamist materjali poorides on raske saavutada (Franzoni 2014; Van Hees jt 2018; Sardella jt 2018). Injekteerimismeetod vajab põhjalikumat uurimist, kuna teave pikaajalise toimivuse kohta on vähene. Injekteeritava vaigu läbitungimise kontrollimine, eriti paksude ja ebakorrapäraste müüritiste puhul, on keeruline (Franzoni 2014).

Kirjanduses vähem kirjeldatud meetodid kapillaarniiskuse tõkestamiseks on vettpidava materjali surumine seinasse lõigatud horisontaalsesse lõhesse, kalde all aukude puurimine soklisse ja elektroosmoos (Gavrilović 2011; Lubelli jt 2018; Franzoni 2014, 2018). Vettpidavate materjalidena horisontaalsetesse lõhedesse surumisel kasutatakse näiteks metallplaate, bituumeniribasid või teisi vettpidavaid membraane. Müüritis peab olema ligipääsetav mõlemalt poolt ja vettpidavad materjalid paigaldatud ülekattega. (Gavrilović 2011)

Muinsuskaitseameti poolt on sokli kuivatamiseks soovitatud soklisse kalde all aukude puurimine ja keraamiliste kuivendustorude paigaldus, millest raskem niiske õhk peaks müüritisest välja voolama (Vundament ja... s.a). Erinevates kirjanduse analüüsides on leitud, et tegemist on ebaefektiivse meetodiga, mis võib osades tingimustes suurendada niiskusesisaldust müüritisest (Lubelli jt 2018; Franzoni 2018). Elektroosmoosi ehk elektrofüüsikalist meetodit on kirjanduses kõige vähem uuritud, kuid olemasolevad uurimistööd ei ole andud kinnitust, et tegemist oleks tõhusa meetodiga (Franzoni 2014).

Kalamees jt (2011) on leidnud, et kõige paremas seisukorras on soklid, millel on puidust veelaud. Vee eemale juhtimiseks piisab korraliku veelauda paigaldamisest sokli serva kohale. Betoonist kalde valamine vihmavee eemale juhtimiseks võib põhjustada esimese palgirea mädanemist, kuna palgi ja valatud betoonriba vahele satub niiskus, mis kuivab väga aeglaselt (Maaelamute sisekliima... 2011). Renoveeritava hoone sokli katmisel kasutatakse restaureerimiskrohve, mis parandavad vee aurustumist, kuna on veeauru läbilaskvad, kuid ei kuivata soklit. Lisaks leevendavad restaureerimiskrohvid soolade kristalliseerumisest tulenevaid kahjustusi (Franzoni 2014). Restaureerimiskrohve on kahte tüüpi, ühed koguvad soolad enda pooridesse, et vältida soolade kristalliseerumist müüritisest (Pavlíková jt 2011), teised transpordivad soolad enda välispinnale, millel need kristalliseeruvad (Falchi jt 2017). Renoveerimiskrohvide kasutamine on ajutine lahendus, kuna mingil hetkel krohvi poorid täituvad soolaga ja krohv puruneb. Vana vundamendi taastamistöödel niiskuse eemaldamisele tähelepanu pööramata ilmnevad defektid lühikese aja pärast uuesti ja tehtud tööd on kasutud. Sokkel jääb märjaks ja külmumistsüklid lõhuvad soklit edasi. (Franzoni 2014) Veeauru läbilaskvad krohvid tuleb katta värvidega, mis ei vähenda veeauru läbilaskvust, näiteks silikaat- ja silikoonvärvidega (Franzoni 2014). Täielikult hüdroisoleeritud vundamendi korral sobivad soklile tsement- ja lubitsementkrohvid, mis on niiskust tõkestavad.

Soklis ja allpool maapinda asuvates tarindites tohib kasutada ainult mittehügrokoopseid soojustusmaterjale (EVS 837). Rebane ja Russak (2019) on vundamendi soojustuseks välja pakkunud vahtpolüstüreen EPS 120 soojustusplaadid ja külmakergete vältimiseks kõrgpolüstüreen XPS horisontaalselt ümber vundamendi. Soojustamise põhjust pole täpsustatud, aga arvatavasti on tööd olulised, et likvideerida külmasillad soklil ja vundamendipõranda liites.

Vundamentide soojustamisel ja mujal pinnases kasutatakse vahtpolüstüreeni (EPS) ja ekstrudeeritud kõrgpolüstüreeni (XPS). Maa-aluste konstruktsioonide soojustamisel on omad miinused, näiteks vee imendumine materjali pooridesse ja materjalide soojusjuhtivuse oluline tõus. Maa sisse niiskesse pinnasesse paigaldatud isolatsioonimaterjalid on pidevas kokkupuutes niiskusega ja peavad seetõttu olema tihedad ja suletud pooridega. Polüstüreenid imavad vett erineva kiirusega ja erinevas koguses. Pakkala ja Lahdensivu (2014) on leidnud, et laboritingimustes oli XPS niiskuse sisaldus peale 48 kuud vette uputatuna 0,25-0,90% ning EPS niiskuse sisaldus 2,52-3,26%. Suur osa niiskusest imatakse materjali esimese kahe kuu jooksul, peale seda niiskuse sisalduse tõus aeglustub märgatavalt. Lisaks on märgitud, et peale tootmist kauem seisnud materjalid imasid vähem niiskust. Isolatsiooni külmudes kahjustuvad EPS-i poorid, mistõttu absorbeerub materjali rohkem niiskust, kuni 6,46%. XPS-il külmumine niiskuse sisaldust ei tõstnud. (Pakkala, Lahdensivu 2014). Uuringud XPS ja EPS kasutamisest maa-alustes konstruktsioonides käsitlevad isolatsioonimaterjalide veeimavust ja R-arvu kahanemist aja jooksul ning on andnud vastuolulisi tulemusi.

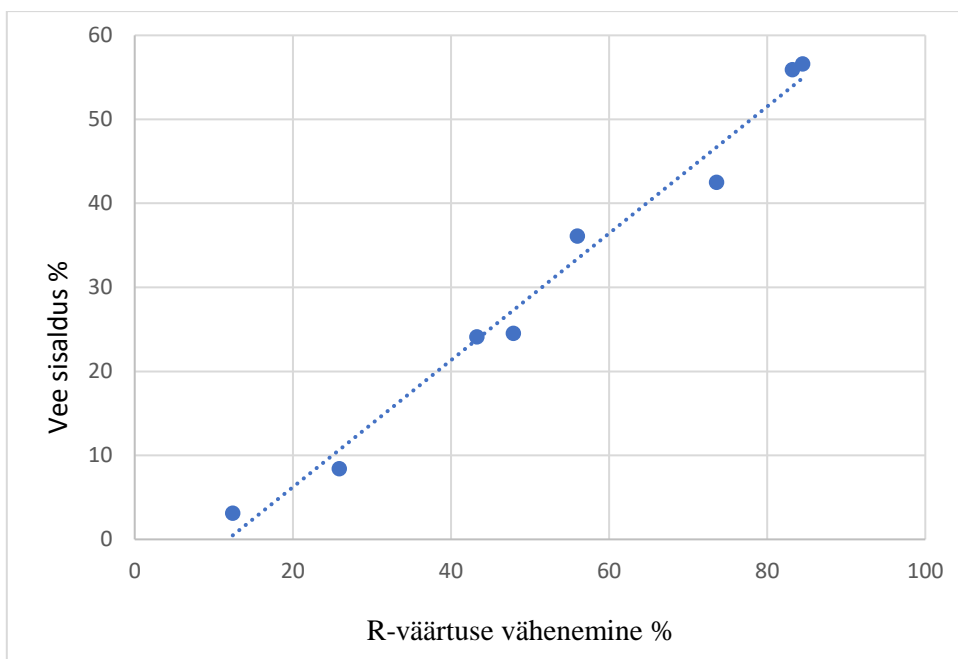
Katseprogrammis, mis viidi läbi 2008. aastal, võrreldi vahtpolüstüreeni (EPS) ja kõrgpolüstüreeni (XPS) isolatsiooni toimivust maa-alustes tarindites. Tulemused näitasid, et EPS-isolatsioon edestas XPS-isolatsiooni parema R-väärtusega ja väiksema niiskuseimavusega (tabel 5). (15-year... 2008) Katsekehadeks kasutatud isolatsioonimaterjalid katsid 15 aastat hoone vundamenti ja asusid umbes 1,8 meetri sügavusel. Töös ei ole välja toodud, millised võisid olla veekoormused vundamendile.

Tabel 5. EPS ja XPS soojustakistus ja vee sisaldus 15 aasta vanustes katsekehades (15-year... 2008)

Soojusisolatsioon	R-väärtuse vähenemine (%)	Vee maht isolatsioonimaterjali kogumahust (%)
EPS (16 kg/m ³)	6	4,8
XPS (25,6 kg/m ³)	48	18,9

Aastal 2013 tehti väidetavalt sõltumatu uuring, mille käigus eraldati XPS isolatsioon mitmest erinevast olemasolevast konstruktsioonist ning uuriti isolatsioonimaterjali niiskussisaldust ja soojatakistuse väärtust. Tulemustest selgub, et standardiseeritud laborites saadud katsete tulemused ja reaalses konstruktsioonides olnud katsekehade niiskussisalduse tulemused ei ole korrelatsioonis. Lisaks kõrgemale veeimavusele on märkimisväärselt vähenenud soojustakistuse väärtus (joonis 6). (XPS insulation... 2013)

Joonis 6. XPS isolatsiooni soojustakistuse sõltuvus vee sisaldusest. (XPS insulation... 2013)



Uuritud katsekehade veesisaldused erinesid väga suures ulatuses. Soojusisolatsiooni omaduste säilimiseks ekspluatatsiooni ajal on oluline, et isolatsioonimaterjalid oleksid paigaldatud korrektselt ja pinnases esinev niiskus soojustatud pindadelt eemale juhitud. (XPS insulation... 2013)

Mitmetes uurimistöodes on leitud, et niiskuse absorbeerimine EPS-is avaldab suuremat mõju soojustakistusele kui XPS-is ja EPS-i R-väärtus langeb ajas kiiremini kui XPS-i. Testitud on EPS-i tihedusega 12-38 kg/m³. Leiti, et maksimaalne niiskusesisaldus EPS-is on 22% ja XPS-is 9% (Connor 2019). Niiskussisalduse korral alla 0,3% tõuseb soojusjuhtivus kuni 2% nii XPS-i kui ka EPS-i puhul. Kõrgema niiskussisalduse kui 0,3% korral hakkab soojusjuhtivus kiiremini kasvama. Kõige väiksem niiskussisaldus EPS-i puhul oli 2% ja selle juures võib soojusjuhtivus erineda kuivast plaadist 20%. Kasutusaeg XPS-i puhul on maksimaalselt 10 aastat, enne kui isolatsioon saavutab niiskussisalduse 1,5%. EPS-i puhul on kasutusaeg maksimaalselt 3 aastat, enne kui isolatsioon saavutab niiskussisalduse 2%. (Cai jt 2018) Oluline mõju isolatsioonimaterjali niiskusesisaldusele on materjali ümbritseval pinnasel ja niiskuskoormusel (Connor 2019). Lamekatusel kasutatud soojustusplaate uurides leiti, et EPS-i keskmine niiskusesisaldus on 11,54%. Uuring tõestab, et ka uuemad polüstüreenist materjalid imavad vett rohkem, kui tootjad ette näevad. Pööratud katuste soojusisolatsiooni uurides on leitud, et ka XPS ei ole 100% veekindel. (Pfeifer 2013) Uurimistööde tulemused näitavad suuremat niiskuse sisaldust polüstüreenist isolatsioonimaterjalides kui tootjad deklareerivad. Tootjate kodulehtedelt leiab uuringuid, milles kajastuvad väga erinevad tulemused.

Vundamendi soojustusele mõjuva niiskuskoormuse vähendamiseks on vett mittesiduva pinnase või kõrge põhjavee korral otstarbekas rajada drenaažisüsteem. Maa-aluse drenaaži eesmärgiks on vundamendile ligipääseva pinnases asuva vee vähendamine (Maaelamute sisekliima... 2011; Franzoni 2014). Drenaažitorustik asetseb paralleelselt vundamendiga tihendatud killustikualuse peal ja on kaetud jämeda täitematerjaliga, mis on pinnasest eraldatud geotekstiiliga. Torustiku paiknemise kohta vundamendi taldmiku suhtes pole kindlat seisukohta lõputöö autor suutnud leida. Levinud on kaks arvamust – kas drenaažitorustik asetseb allpool vundamendi taldmikku või taldmikuga ühel tasapinnal. Soojustus tuleb katta drenaažimatiga, mis omakorda kaetakse geotekstiiliga ja ulatub kuni drenaažitoruni. Drenaažimatt tagab vundamendini jõudnud pinnasevee drenimise drenaažitorustikuni. Drenaaž ei takista täielikult vee tungimist vundamenti ja kapillaartõusu vundamendis, kuid alandab maksimaalset veetaset pinnases (Franzoni 2018) ja vähendab vee survet soojustusele.

3.1.2 Põrandad

Gillott jt (2016) leidsid, et puidust tuulduva põranda tihendamisel seinte liitekohtadest paranes õhupidavusarv 50 Pa alarõhu juures terves hoones $3,6 \text{ m}^3/(\text{h}\times\text{m}^2)$, millega vähenes kogu hoone õhupidavus 23%. Paremad tulemused on saavutatud avatäidete tihendamisega, kokku $4,5 \text{ m}^3/(\text{h}\times\text{m}^2)$ 50 Pa alarõhu juures. Uurimistöös pole välja toodud, milliseid materjale tihendamisel kasutati, kuid tulemused näitavad, et põrandate tihendamine seinte liitekohtadest parandab õhupidavust märgatavalt.

Põranda ja seina liitekohtade tihendamiseks kasutatavate materjalide toimivust on uurinud Peeter Antsov (2014) enda magistritöös. Klombitud müürikivi ja betoonpõranda liitekoha tihendamiseks katsetati kuut erinevat lahendust. Parim tulemus saavutati, kui liitekoht puhastati ja tihendati vuugitihendiga (polüetüleentihend) ning seejärel kaeti ms-polümeeril põhineva hermeetikuga. Tihend katab suure osa liitekohast ja hermeetik väiksemad vahed. Hea tulemuse andis ka isepaisuva tihendi (polümeer- või akrüüldispersiooniga immutatud PUR isoleerkleplint) kasutamine, mille puuduseks on väiksemate vahede ebapiisav täitmine. Keramsiitploki ja põranda liitekoha tihendamisel andis parima tulemuse liite täitmine vahtpolüstüreenist ribaga ning põranda ja liitekoha isetasanduva seguga katmine. Efektiivne meetod õhupidavuse parandamiseks on betoonpõrandaaluse kile kleepimine seina ja sokli vahelise hüdroisolatsiooni külge. (Antsov 2014)

Pinnasel põrandate soojustamine on oluline, et vähendada soojuskadusid läbi põrandate. Peale energiatõhususe parandamise on soojustuse ülesandeks vähendada veeauru difusiooni maapinnast siseruumidesse. Soojustus põranda all hoiab betooni temperatuuri kõrgemal ja soojustuse all oleva pinnase temperatuuri madalamal. (Leivo, Rantala 2008) Kapillaarniiskuse levikut pinnasest soojustuskihini on oluline takistada, et vältida soojustuse märgumist. Peamiseks lahenduseks on jämedateralise kruusa või killustiku kasutamine täitematerjalina pinnasel põranda all. Täitematerjal, mille terade suurus on minimaalselt $d > 1 \text{ mm}$, peatab kapillaarniiskuse tõusu efektiivselt. (Rantala, Leivo 2009)

Niiskust tõkestab ka kahes kihis ja ülekatetega polüstüreenist soojustus (Rantala, Leivo 2009). Vähesese auru läbilaskvusega põrandakatteid võib kasutada soojustatud pinnasel põrandate puhul, sest soojustamata põrandate puhul on põrandaalune pind soojem, veeauru osarõhk põranda all

suureneb ja rohkem niiskust difundeerub tупpa. Vähese läbilaskvusega põrandakatte puhul jääb niiskus soojustamata põrandal põrandakatte alla ja see suurendab niiskuskahjustuste ning mikroobide kasvu tõusu. (Rantala, Leivo 2009)

Sarnaselt vundamentidele, on pinnasel põrandate soojustamisel kõige sagedamini kasutatav soojustusmaterjal polüstüreenist isolatsiooniplaadid, mis paigaldatakse betoonplaadi alla dreniiva täitematerjali peale. Kapillaarniiskus liigub vähesel määral ka läbi jämedateraliste täitematerjalide ja seetõttu on soojustusmaterjal niiskes keskkonnas nagu ka vundamentide korral. Kapillaartõusuga täitematerjali ülemisse osasse jõuab vett vähe, kuid piisavalt, et hoida täitematerjali aastaringiselt. Tegemist on loomuliku tingimusega pinnasega kokkupuutes olevas konstruktsioonis (Rantala, Leivo 2008). Põrandaid on vaja soojustada ja olenemata isolatsioonimaterjalist, on vaja niiskuse juurdepääsu isolatsioonini maksimaalselt takistada.

Klassikaliselt kasutatakse pinnasel põranda puhul ühe kihina 0,2 mm paksust polüetüleenkilet. Ühe teooria järgi kasutatakse kilet soojustuse ja betoonplaadi vahel eesmärgiga, et betoonis esinev niiskus liiga kiiresti maa sisse ei kuivaks. Teise lahendusena asetatakse kile soojustuse ja pinnase vahele, et teakistada kapillaarniiskuse tõusu soojustuseni. Selline pinnaseniiskuse isoleerimine ei pruugi olla pikaajaline lahendus, sest 0,2 mm paksuse kile pikk eluiga betooni all on kaheldav. Killustikust täitematerjali puhul muljuvad teravad killustiku terad kilesse augud. Tasase liivast aluse puhul võib kile paremini vastu pidada, aga selle kestvus põranda all jääb kaheldavaks.

Põrandaid saab pinnasele ehitada ka ilma betoonplaadita. Rebane ja Russak (2019) on põranda renoveerimislahendusena pakkunud keramsiitkruusaga soojustamist ja põrandalaagide keramsiitplokkidele toetamist. Veski (1969) toob pinnasele põranda ehitamiseks välja vanades maamajades kasutusel oleva meetodi, ehk talad toetuvad vundamendi äärele ja soojusisolatsiooniks on paks liivakiht. Keramsiitkruusaga või liivaga soojustamise eeliseks on nende meetodite sarnasus algupärastele lahendustele ja lihtne teostamine. Veski (1969) on väitnud, et puit otseses kontaktis liivaga ei mädane, sest liiv on nõrgalt kapillaarne ning toa poolses soojemas keskkonnas on veeauru osarõhk kõrgem kui maapinnas ja niiskus surutakse aja jooksul liivakihi alla pinnasesse. Keramsiitkruusaga soojustatud ja ilma õhuvaheta puitpõrand võiks toimida sama moodi. Soojusläbivuse soovitus põrandale KredEx juhendis „Liginullenergia eluhoone Väikemaja juhend“ (KredEx juhendmaterjal... 2017) on 0,1-0,12

W/(m²×K). Arvestades, et keramsiitkruusa soojuseri juhtivus on standardi „Ehitusmaterjalid ja -tooted. Soojus- ja niiskustehnilised omadused. Tabuleeritud arvutusväärtused ja deklareeritavate ning arvutusväärtuste määramise meetodid“ (EVS-EN ISO 10456) järgi 0,07-0,15 W/mK, siis nõude täitmiseks peaks kruusa kiht olema ligi meetri paksune. Masso (2012) on liiva soojuseri juhtivuseks toonud koguni 2,0 W/mK. Pinnases alati esineva niiskuse tõttu ei saa soojuslähivust arvutades arvestada kuiva kruusa või liivaga. Kõrge soojusjuhtivuse tõttu pole võimalik liiva ja kruusaga pörandaid soojustades liginull- või madalenergiagoonete nõudeid täita.

Tuulduvate pörandate renoveerimisel tuleb eemaldada kõik mädanikkahjustustega konstruktsioonid, süvendada pörandaalust ruumi ja taastada tuulutus avades tuulutusavad.. Tuulduva pörandaga hoone korral peab soklit soojustama nii väljast kui ka seest poolt, sest ainult väljast soojustades pääseb külm välisõhk soklile ligi pörandalt. Pörandalaagide vahele tuleb lisada soojustus, mineraalvilla korral ka tuuletõke soojustusest külmemale poolele. Pörandalaagide peal võiks õhupidavuse parandamiseks olla puitplaat. Tuulduva puitpörandalaagide miinuseks on pörand ja seina vahelise liite keerukus.

3.1.3 Seinad

Ehitusfüüsikalisest aspektist lähtuvalt tuleks hoone renoveerimisel kõige enam tähelepanu pöörata välispiirete soojustamisele, soojustagastusega ventilatsiooni paigaldamisele, külmasildade minimaliseerimisele ja õhutiheduse tagamisele (Alev jt 2014). Välisseinte soojustamisel on hoone energiasäästlikkusele kõige suurem mõju (Kalamees jt 2017b), sest seinte pindala võrreldes teiste piiretega on märgatavalt suurem. Kuni 2009. aastani kehtinud standardis EVS 837-1:2003 „Piirdetarindid. Osa 1: Üldnõuded“ (EVS 837) olid välja toodud üldnõuded piirdetarinditele. Konstrueerides piirdetarindeid on oluline jälgida, et niiskuse kondenseerumine tavatingimustes oleks välistatud. Soojustusest seespool asetsevate materjalide summaarne aurupidavus peab olema vähemalt 1,2 korda suurem kui soojustusest väljaspool paiknevate materjalide summaarne aurupidavus. Olukorras, kus aurutihe kiht asub kahe soojustuskihi vahel, ei tohi sisemise soojustuskihi soojapidavus ületada 40% kogu piirde soojapidavusest. Viimane lahendus on lubatud vaid normaalse sisekliimaga ruumide puhul, mille õhuniiskus kütteperioodil ulatub kuni 60%-ni. (EVS 837)

Lisasoojustuse hoolika planeerimise korral on võimalik vältida hoone välisilme kahjustumist ja esialgse miljööväärtuse kadumist. Hoone arhitektuurset välisilmet kahjustamata on võimalik 50-100 mm paksune lisasoojustamine (Maaelamute sisekliima... 2011). Alev jt 2014 leidsid, et kõige rohkem mõjutab energiatarbimise vähenemist välisseinte soojustamine 150-200 mm paksuse soojustuskihiga. Seejuures on oluline märkida, et saadud tulemus on saavutatav tingimusel, et hoone on õhupidav (Alev jt 2014). Soojustamise käigus pöörata tähelepanu korralikult tuule- ja õhutõkke tihendamisele (Alev 2017).

Piisavat õhutihedust on võimalik tagada tuuletõkkekihi ja selle vuukide tarindusega, piirde erinevate sõlmede õhutiheda tarindusega ning avatäidete sulgemispilude tarindusega (EVS 837; Maaelamute sisekliima... 2011; Kalamees jt 2017a). Tuuletõkke peab efektiivseks toimimiseks olema pidev ja õhutihedusega vähemalt $50 \text{ m}^2\text{hPa}/(\text{m}\times\text{g})$ (EVS 837). Õhutõkkematerjali liidete tihendamine ja kasutatud õhutõkke materjal on võrdselt olulised, sest enamus õhulekkeid esineb hoone komponentide ühenduskohtades. Õhutõkke võib asetseda nii sees- kui ka väljaspool kandekonstruktsiooni. (Kalamees jt 2017a) Kõige enam parandab hoone õhupidavust välisseina katmine õhutiheda materjaliga seestpoolt (Alev 2017). Hoone seestpoolt tihendamine on aga keeruline ja kulukas, sest seintesse on kinnitatud mööbel ja installatsioonid (Maaelamute sisekliima... 2011). Õhutõkkena võib toimida ka soojustus või kandekonstruktsioon (Kalamees jt 2017a). Seintest või laest puitplaadi või krohvi eemaldamisel tuleks need asendada, et vältida õhulekete suurenemist (Alev 2017).

Tuule- ja aurutõkete liidete tihendamiseks kasutatakse spetsiaalseid teipe. Teibid peavad pindadega korralikult nakkuma, olema vastupidavad äärmuslikele temperatuuridele, UV-kiirgusele, niiskusele ning taluma saasteaineid. Teibid on peale hoone ehitamise või renoveerimise lõppu enamjaolt ligipääsmatud, mistõttu peavad need vastu pidama hoone kavandatud kasutusaja vältel. Tihendusmaterjalide kasutamisel tuleb olla ettevaatlik ja järgida tootja soovitusi, sest vigased töövõtted mõjutavad tuule- ja aurutõkke toimivust rohkem, kui materjali vananemisest tingitud kahjustused. (Van Linden, Van den Bossche 2020)

Palkhoonetel on suured õhulekked palkide vahelistes varades ja nurgatappides, seetõttu on oluline koos lisasoojustustöödega viia läbi ka palgivahede tihendamine (Maaelamute sisekliima... 2011). Palkide vaheline tihendamine on kõige lihtsam viis õhupidavuse parandamiseks ja arhitektuurse ilme säilitamiseks. Tihendamiseks võib kasutada nii looduslikke

kui ka tehismaterjale. Parim naturaalne materjal varade täiteks on turbasammal (Maaelamute sisekliima... 2011; Alev jt 2017). Palkhoone nähtavaks jäämisel on visuaalsest kõige sobilikum kasutada naturaalseid materjale.

Uutest materjalidest on parimad suletud rakustruktuuriga elastne polüetüleenitihend (*backer rod*), spetsiaalne vuugihermeetik (*special joint sealant*) ja paisuvad poliüuretaanvahud. Võrreldes poliüuretaanvahuga, ei suuda polüetüleenist tihendusribad kõiki pragusid täita (Alev jt 2017). Uuringu käigus katsetati erinevaid tihendeid nurgatappides, kuid uuritud materjalid võiksid efektiivselt toimida ka varades ja kahanemispragudes. Antsov (2014) on uurinud põrandate tihendamisel mitmeid tihendeid, millest üks parimaid oli polümeer- või akrüüldispersiooniga immutatud vahtpoliüuretaanist tihenduslint, mis on auru läbilaskev ja peab vastu hoovihmale ning sobib seetõttu kasutamiseks palkide vaheliseks tihendamiseks väljastpoolt. Palgi tihendushermeetik (*textured log caulk*), mida kasutati palkide kuivamispragudes, ei parandanud palkseina õhupidavust (Alev jt 2017). Lisasoojustamisel on kõige lihtsam seinte läbipuhutavuse vähendamiseks soojustuse ja palkseina vahele paigaldada õhutõkkepaber (Maaelamute sisekliima... 2011). Õhupidavamaks renoveeritud hoones tuleb tekkinud niiskust hakata eemaldama sundventilatsiooni kaudu (Bjarløv, Vladyková 2011).

Kandekonstruksiooni välispinna soojustus eeldab terve elamu soojustustamist korraga, kuid hooneomanikud võivad soovida elamut soojustada osade kaupa, mis on seestpoolt soojustamise puhul võimalik (Maaelamute sisekliima... 2011). Välisseinte seespidine lisasoojustus on alati seotud niiskustehniliste riskidega. Halvimal juhul võivad tekkida eeldused hallituse kasvuks või veeauru kondenseerumiseks. Sisemise soojustamise korral peab hallituse tekke vältimiseks olema tagatud õige aurutõkke valik ja selle korralik paigaldus ning madal niiskus eluruumides. Sisemise soojustuse puhul tuleb kasutada aurutõkkeid, mille difusioonitakitsus on üle kahe meetri, soovitatavalt vähemalt 10m (Kalamees jt 2018). Aurutõkke toimimiseks on oluline selle hoolikas paigaldus (Kalamees jt 2018) ning erinevate läbistuste vältimine (Alev, Kalamees 2016), kuid praktikas on keeruline aurutõkke omavahelisi liiteid tihendada (Alev 2017). Seestpoolt soojustuse niiskustehnilist toimivust mõjutavad mitmed parameetrid nagu soojustuskihi ja palkide paksus, palkidest konvekteruva õhu hulk, sise- ja välisõhu temperatuurid, relatiivne õhuniiskus, seinakihtide niiskustakistus ja palkhoonetel ka palkide niiskussisaldus (Alev 2017). Projekteerija ja ehitaja peavad vastavalt kõigile parameetritele

soojustuse projekteerima ja ehitama (Kalamees jt 2018). Maksimaalne soovitatud sisemise soojustuskihi paksus on 50 mm, seda ka juhul, kui on kasutatud aurutõkkeid, palgi niiskussisaldus on alla 12% ja õhuniiskus ruumis on madal (Alev, Kalamees 2016). Üldiselt ei tohiks viimistluskihtidega täiendava sisemise isolatsioonikihi maksimaalne soojustakistus olla suurem, kui palkseina soojustakistus enne isolatsiooni lisamist (Kalamees jt 2018).

3.1.4 Avatäited

Renoveeritavate hoonete välispinnale lisatakse enamasti soojustust ja liigutatakse ka aknad müüritise tasapinnast väljapoole soojustuse vahele, tekitades ekstsentrilise koormuse kandvale seinale. Kandva seina tasapinnast akende välja toomiseks kinnitatakse aknad spetsiaalsete klambritega või ehitatakse aknaraami ümber puidust raam. (Van Den Bossche, Janssens 2016) Vältimatuid probleeme tekitab, kui akna ümber valmistatakse puidust raam ning sellel ei lasta enne akende paigaldamist lõpuni kuivada. Kõrge kvaliteediga puidu kasutamisel jääb temperatuuri ja õhuniiskuse muutumisel samuti võimalus niiskusdeformatsiooniks, millega kaasneb krohvivõrgu rebenemine ja vihmavesi pääseb puitraamile ligi. Raami liikumisel niiskusdeformatsiooni tõttu ei liigu raam kontrollitult, mille tulemuseks on ebatihedad aknaümbrused, sest auru- ja tuuletõkketeibid rebitakse lahti. Teipide purunemisel pääseb niiskus toast akna tihendusvuuki ja märgab isolatsioonimaterjali ja akna enda, mis puitakende puhul hakkab mädanema. (Tiitsaar 2018)

Hallik ja Kalamees (2020) on läbi viinud arvutusliku uuringu akna ja seina liitekohas, et välja selgitada avatäidete paigaldusmeetoditest tulenevad soojus- ja niiskustehnilised erinevused. Võrreldi liitekoha joonsoojusläbivust kolme erineva kinnituslahenduse puhul: terasest konsoolid, puidust paigaldusraam ja seinale liimitav tugevdatud soojustusmaterjal. Aknad kinnitati Columbia-kivist müüritisele ja raudbetoonist seinapaneelile. Redutseeritud joonsoojusläbivuse erinevus puitraami ja tugevdatud soojustusmaterjali vahel on 66%, Ψ väärtused vastavalt 0,0955 ja 0,0574 W/(m×K). Konsoolidega paigaldatud avatäite joonsoojusläbivuse sõltus akna paiknemises soojustuskihi erinevates sügavustes. Klambritega akna paigaldamisel soojustuse sisemise küljega tasa andis tulemuseks 0,0599 W/(m×K), avatäite nihutamisel 50 mm võrra kaugemale soojustuse sisse andis tulemuseks 0,0518 W/(m×K) mis teeb erinevuseks 14,5%. Kõige parem tulemus saadi nihutades aknad

konsoolidega 50 mm sügavusele soojustuse kihti ja kasutada PVC akna puhul standardse plastikust profiili asemel tugevast soojustusmaterjalist paigaldusprofiili. Viimasel juhul oli soojusläbivuse tulemuseks 0,0326 W/(m×K). (Hallik, Kalamees 2020) Kinnitusklaambrites ja tugevdatud soojustusmaterjalides ei teki niiskusdeformatsioone ja akende liited on ajas püsivamad.

Hoonete välispiirete läbisuste ja liidete tihendamiseks kasutatakse erinevaid materjale: tihendusteibid erinevatele pindadele, õhutihedad membraanid, tihendusliimid ja -hermeetikud, erinevad tihendusribad ning montaaživahud (Hallik jt 2019). Akna õhutihedus sõltub akna kujundusest ja tootjast, akna ümbruste õhutihedus aga valitud materjalidest, tihendamistehnikast ja -kvaliteedist (Relander jt 2008). Kalamees jt (2017) on uurinud puitkarkasshoone kaheksa erineva tihendatud sõlme õhupidavust. Akna ja seina liide oli õhupidavuse poolest parima tulemusega, mis näitab, et avatäidete liiteid on võimalik saada õhupidavaks korraliku tihendamise tulemusel.

Väljast ilmastikukindla ja seest aurukindla teibiga tihendatud akna ja seina vahelise liite õhulekkearv oli 0,05 m³/(h×m²) (Kalamees jt 2017a). Relander jt (2008) leidsid, et parima tulemuse õhupidavuse testides annab teip, õhulekkearvuga 0 m³/(h×m²). Teipide efektiivseks pikaajaliseks toimimiseks on ülioluline nende paigaldamisel kasutada korrektseid töövõtteid. Palkhoonete palkide otsad aknapõskedes on mahukahanemise tõttu pragunenud. Alev jt (2017) teipisid akende tihendamisel palkide otsad, aga akna liite õhupidavusele see mõju ei avaldanud. Ainult teipimisel tagatakse õhu- ja aurupidavus, aga soojapidavuse parandamiseks on liide vaja täiendavalt täita mineraalvilla, vahu või muu soojustusmaterjaliga. Bossche jt (2012) on akende teipimiseks välja toonud kaks erinevat viisi. Ühe viisina on kirjeldatud teipimist aknaraami äärtesse ning seinale, teise viisina kahepoolse teibiga teipimist aknaraami siseküljele ja seinale.

Tabel 6. Tihendatud akende õhulekkearvud m³/(h×m²)

Uuring	Teip	PUR	Polüetüleentihend
Alev jt 2017	-	7,4*	18,2*
Kalamees jt 2017a	0,05	-	-
Relander jt 2008	0	-	0,97
Van Den Bossche jt 2012	0,19	1,36	-

Märkused

1. Tähis “*” tähistab, et tulemusi mõjutasid palkseina õhulekked.
2. Tähis “-“ märgib, et uuringus andmeid ei kajastatud.

Tänapäeval on akende tihendamiseks laialdaselt kasutusel erinevad montaaživahud (Hallik jt 2019). Parimaid tulemusi palkhoone akende liidete tihendamisel erinevate tihendusmaterjalidega andis poliüuretaanvahu kasutamine (tabel 6). Alev jt (2017) palkhoone uuringus on akende õhulekkearvud võrreldes teiste töödega väga kõrged, kuna õhukindlasse mõõtekambris ehitati palksein, mistõttu liikus õhk peale akna liite lisaks ka läbi palkseina ebatiheduste. Poliüuretaanvaht, mida kasutatakse tihendusmaterjalina palkseina ja akna vahel, võib praguneda tingimustes, kus palgid paisuvad ja kahanevad, kuid raam säilitab enda mõõtmed (Alev jt 2017). Oluline on montaaživahu valikul jälgida, et see sobiks akende tihendamiseks. Lisaks vahu- ja paigalduskvaliteedile mõjutavad poliüuretaanvahu tihendusvõimet vuugi ruumala ja vahtu ümbritsevad materjalid. Väiksema tihendatava ruumi korral on rõhk vahu paisumisel suurem ja ruum täitub tihedamalt (Hallik jt 2019).

Paisuva vahu tihendusvõime sõltub seda ümbritsevatest materjalidest, näiteks hõõveldatud puidu vahel tihendab poliüuretaanvaht ruumi tihedamalt kui saetud puidu vahel, kuna siledamale pinnale jääb vähem õhukanaleid. Vahu tihendusvõime parandamiseks on seega oluline pindade korralik ettevalmistus. Poliüuretaanvaht vajab paisumiseks niiskust, seetõttu paisub vaht puidu vahel paremini kui PVC vahel. Plastikaknaid poliüuretaanvahuga tihendades tuleks aknaraami enne kergelt niisutada. (Hallik jt 2019) Akende vahele pihustatav poliüuretaanvaht pole aurutihe ja tuleb täiendavalt teipida.

Müüritisest seina ja akna liide on halvema õhupidavusega kui puitseina korral, sest müüritis on vähem õhupidavam ja ebatasasem. Müüritisest seina ja akna vahelise liite õhupidavuse uuringus (Van Den Bossche jt 2012) leiti, et seina ja akna vahel on kõige efektiivsem kasutada korraga poliüuretaanvahtu, suletud pooridega polüetüleenitihendeid ja mastiksit aknaraami siseküljel. Kasutades poliüuretaanvahtu ilma täiendavate tihendamisteta, on õhulekkearvuks keskmiselt $1,36 \text{ m}^3/(\text{h} \times \text{m}^2)$ 50Pa juures (tabel 6). Õhupidavus paraneb veelgi tulemuseni $0,1 \text{ m}^3/(\text{h} \times \text{m}^2)$, kui kasutada lisaks vahule polüetüleenist tihendit koos mastiksiga (Van Den Bossche jt 2012).

Ainult polüetüleenist tihendunööri kasutamisel koos tihendusmastiksiga leiti õhulekkearvuks $0,97 \text{ m}^3/(\text{h} \times \text{m}^2)$ (tabel 6) (Relander jt 2008). Alev jt (2017) leidsid palkseina ja akna liite tihendamisel polüetüleenitihendiga õhulekkearvuks $18,2 \text{ m}^3/(\text{h} \times \text{m}^2)$ (tabel 6), mida oli oodatust vähem. Töö autorid põhjendasid tulemust sellega, et polüetüleenitihend ei suuda väikeseid pragusid piisavalt tihedalt täita. Polüetüleenitihendiga koos tuleb kasutada ka tihendusmastiksit.

Tihendusriba peamiseks ülesandeks on suurema osa avast täitmine enne tihendusmastiksiga katmist. Alev jt (2017) töös leitud tulemused erinesid oluliselt teistest uurimistöödest, sest peale akndaliite ebatiheduste mõjutasid katset ka palkseina õhulekked

Peale teipide kasutatakse tihendusmaterjalidena ka mineraalvilla, isepaisuvaid tihendeid ja soojustusplaate aknapõskedel (Relander jt 2008). Tihe mineraalvill ei suuda tagada korralikku õhutihedust ja sellepärast on liide vaja täiendavalt teipida seest auru- ja väljast tuuletiheda teibiga. Suure õhulekkega oli ka isepaisuv tihend, vaatamata sellele, et kasutatud tihend oli õiges mõõdus. Relander jt (2008) läbi viidud uuringus leiti, et ainult mineraalvillaga tihendatud akna liite õhulekkearv oli $2,90 \text{ m}^3/(\text{h} \times \text{m}^2)$ ja isepaisuval tihendil $3,93 \text{ m}^3/(\text{h} \times \text{m}^2)$. Kasutades akna ja seina liite tihendamisel ning aknapõskede viimistlemiseks soojustusplaati ja krohvimist, on võimalik saada liide väga õhupidavaks. Oluline on kasutada aknaraami ja -põse liitekohas aknaliiteprofiili ja tihendada liide tihendusriba ja mastiksiga.

3.1.5 Vahelaed

Hoone õhutihedamaks ehitamisel tekib vajadus suunata värsket õhku eluruumidesse läbi sundventilatsiooni, mille torud läbivad vahelagesid ja katust. Toru läbiviiku laes võib olla ebamugav tihendada, sest see asub kõrgel ja on ümara kujuga.

Hoone renoveerimise käigus mehaanilise ventilatsioonisüsteemi paigaldamisel viiakse sissepuhke ja väljatõmbe ventilaatorid läbi seinte või vahelagede ja nende tihendamine mängib olulist osa õhupidavuse saavutamisel. Bracke jt (2014) on leidnud, et suurimad õhulekked väga õhupidavates passiivhoonetes esinesid katuslael ventilatsiooni läbiviikude ümbruses. Mortenses ja Bregssøe (2017) on samuti maininud õhulekkeid elektriinstallatsioonide, ventilatsiooni või küttekehade läbiviikude ümbruses. Bracke jt (2014) uurisid PUR-vahuga, õhutõkketeipidega ja EPDM mansettidega tihendatud läbiviikude õhupidavust. Parimaid tulemusi õhupidavuses andsid EPDM mansetid ja butüülteip, mõlemad on mõeldud just kolme dimensiooniga ühenduste tihendamiseks. Tihendi plussiks on veel vahetudest ja teipidest parem vastupidavus mehaanilistele vigastustele ning läbiviigis torude ja kaablite liikumisele (Bracke jt 2014).

Vahe- ja katuslae soojustamine ja õhupidavamaks renoveerimine sarnaneb seintega, sest puudu jääb sooja- ja õhupidavusest. Kõige enam vajab tähelepanu sõlmede, ehk seinaga liite, aga ka näiteks pööninguluugi ümbruse tihendamine. Õhupidavust laes parandavad tihedad plaatmaterjalid või õhutõkkepaber. Plaatmaterjalideks on näiteks puitplaadid, mis kinnitatakse talade toa poolsele osale. Sein ja lae vahele jääva liite tihendamiseks võib kasutada sama lahendust, mida palkide varade tihendamisel. Talade vahelise soojustuse peab katma tuuletiheda materjaliga ja ühendama selle seina tuuletõkkekihiga. Rebane ja Russak (2019) on lae renoveerimislahenduses kasutanud vineeri ja villa vahel aurutõket, millel on ka õhutõkke funktsioon. Tuulduva pööningu korral tuuldub vahe- või katuslakke pääsenud niiskus välja ning aurutõkestuseks lõputöö autor põhjust ei näe. Kattes pööningu põranda plaatidega võib tekkida probleem niiskuse välja kuivamisega vahelaest kütmata pööningule. Puitplaadid on piisava aurutihedusega, et külmemal pool kasutades ei pääse niiskus välja kuivama ja kondensaat võib tekkida plaadi ja soojustuse vahele.

4. ARUTELU

Renoveerimistöid planeerides on mõistlik arvestada ajas karmistuvaid energiatõhususe nõudeid ja Euroopa Liidu pikaajalist eesmärki saavutada aastaks 2050 süsinikuneutraalne keskkond. Otstarbekas on renoveerimistöid planeerides arvestada energiaklassi A saavutamisega, et enne aastat 2050 ei peaks kõiki renoveerimistöid uuesti ette võtma. Esialgu võib renoveerimist planeerivale inimesele tunduda säästlikum kasutada ehitustöödeks võimalikult odavaid lahendusi, kuid arvestades pidevalt muutuvat energiapoliitikat, on mõistlik valida toimiv ja pikaajaliselt kestev lahendus. Renoveerimistöde planeerimine karmistuvaid nõudeid arvestades on ehitusspetsialistidele väljakutseks. Oluline on leida lahendust vajavad probleemid ja parimad võimalikud lahendused arvestades ehitusmaksumust ja planeeritavat energiatõhususe tulemust, et saavutada kuluefektiivsus. Ehitustööde kvaliteet on sama oluline kui renoveerimistöodeks kasutatud materjalid (Ralender jt 2008; Maaelamute sisekliima... 2011; Vinha jt 2015; Rebane, Russak 2019), mistõttu on töö autori arvates tähtis panustada tööjõu kvalifitseerimisele, süsteemsele järelvalvele ja piisavale ajaressursile ehitusgraafikus. Töö autori kogemusele tuginedes on ehitusplatsil alati kiire ja tööde kvaliteedile ja kvaliteedikontrolli põhjalikkusele saab määravaks ettevalmistuse ja planeerimise etapp.

Põhilisteks energiatõhusust mõjutavateks teguriteks on piirdetarindite soojusläbivus ja õhupidavus, kuid olulised on ka kaasaegsed kütte- ja ventilatsioonisüsteemid. Kalamees jt (2011) on leidnud, et 15 cm läbimõõduga palkidega palkhoone soojusläbivuseks on $0,7 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$. Vanasti kasutatud 200 mm paksuste plokkide, peamiselt gaaskukeroon- ning gaassilikaltsiitplokkide, soojuserijuhtivus pole täpselt teada, kuid võib jääda samasse vahemikku tänapäevaste tehaseliste betoonplokkide vastavate näitajatega, mis teeb plokkseina soojusjuhtivuseks $U_{\text{välissein}}=0,5-1,0 \text{ W}/(\text{m}^2 \times \text{K})$. Nii palk- kui ka plokkseinte soojapidavus ei vasta tänapäevastele energiatõhususe nõuetele ja hooneid renoveerides on piirete soojustamine vältimatu. Lisaks seintele vajavad lisasoojustamist ka kõik teised piirdetarindid ning energiatõhususe parandamisel on oluline roll avatäidetel.

Varem kehtinud hoone energiatõhususe miinimumnõuete määruses olid välja toodud konkreetsed soojuslähivuse väärtuste vahemikud erinevatele piirdetarinditele. Hetkel kehtivas Ettevõtlus- ja infotehnoloogiaministri 2018.a määruses nr 63 (EV määrus nr 63) nõutavaid U-arve välja toodud pole, vaid rõhutakse energiatõhususarvule (ETA), mis annab alust arvata, et ainult piirete soojuslähivust parandades ei suudeta muuta hoonet nõutavale energiatõhususe tasemele. SA KredExi 2017. aastal koostatud juhendis „Liginullenergia eluhoone. Väikemaja juhend“ (KredEx juhendmaterjal... 2017) on välja toodud soovituslikud soojuslähivuse väärtused liginullenergiahoonetele, mis on karmimad kui 2015-2019 aastatel kehtinud määruses nr 55 „Hoone energiatõhususe miinimumnõuded“. Suur mõju energiatõhususe tõstmisele võiks olla õhupidavuse parandamisel, kuna nii Eesti Maaülikooli lõputöodes kui ka erialateadlaste uurimistöodes on ehitiste tehnilise seisukorra hindamistel leitud suuri õhulekkearve. Energiatõhususe saavutamine on hoone kompleksse renoveerimise tulemus ning soojuslähivus ja õhupidavus on selle olulised osad.

Sõltuvalt seina-, põranda- ja laekonstruktsioonist erinevad hoonete õhupidavuse näitajad üksteisest, kuid ei vasta varem kehtinud nõuetele. Palkhoonete madalam õhupidavus on seostatav sellega, et puidu niiskusdeformatsioonidega tekkivad praod palkide vahel tekitavad oluliselt palju õhulekkeid. Rebane ja Russak (2019) ning Kalamees jt (2011) leitud tulemused erinesid kahekordselt, vastavalt 15 ja 29 m³/(h×m²), kuid kumbki tulemus pole lähedal õhupidavuse nõuetele. Taanis uuritud tellishoonetel on samuti leitud suuri erinevusi õhupidavuses, vahemikus 4-21,5. Olulisi erinevusi ei leitud ka hoone ehitus- või renoveerimisaastast lähtuvalt. (Mortensen, Bergsøe 2017) Tulemus võib viidata sellele, et vaatamata ajas arenevatele tihendusmaterjalidele, ei ole õhupidavuse tulemused paranenud või on olemasolevaid hooneid uutest hoonetest keerulisem tihendada. Mõlemal juhul on oluline tööde teostamise kvaliteet, mille mõju loodetud tulemusele on rõhutanud ka teised uuringud (Ralender jt 2008; Maaelamute sisekliima... 2011; Vinha jt 2015; Rebane, Russak 2019).

Sõltumata renoveerimise eesmärgist, tuleb likvideerida renoveeritava tarindi kahjustused ja nende tekkepõhjused. Olenemata hoone konstruktsioonist, on nii Eestis kui ka välismaal (Tabel 2) väga levinud niiskuskahjustused. Vanadel hoonetel põhjustavad niiskuskahjustusi valdavalt sademed, mis pääsevad läbi ebatiheduste konstruktsioonidesse ja ei kuiva välja. Likvideerides vee läbijooksu kohad ja ebatihedused, paraneb lisaks niiskuskindlusele ka õhupidavus. Hoonete

renoveerimise käigus konstruktsioonikihtide asendamine või lisamine olemasolevatele, võib kaasa tuua probleemid gaasilisel teel liikuva vee ehk veeauruga. Piirettesse difundeerunud niiskuse kondenseerumise vältimiseks on kõige lihtsam pidada kinni põhimõttest, et külmemal poolel tuleb kasutada väiksema veeauru juhtivusega materjale kui soojemal poolel. Veeauru difusiooni soojemalt poolelt külmemale on võimalik takistada aurutõkkega, kuid Alevi doktoritöös (2017) on välja toodud, et praktikas on aurutõkke liiteid keeruline tihendada. Konstrueerides seinad selliselt, et kondensipunkt piirdes puudub, pole vaja aurutõkkeid kasutada.

Varasemalt koostatud lõputöödele, teaduskirjandusele ja käesoleva lõputöö autori kogemusele tuginedes, on soojustustöid teostades olulisel kohal vundamendi ja sokli soojustamine. Enamus uurimistöid, mille käigus hooneid termografeeritakse, on leidnud, et sõltumata hoone seinakonstruktsioonist esineb oluline külmasild sokli ja põranda liitekohas. Lahendusena pakutakse eelkõige sokli ja vundamendi soojustamist niiskuskindlate isolatsioonimaterjalidega, milleks on XPS ja EPS Perimeeter. XPS ja EPS on vahtpolüstüreenid, XPS on ekstrudeeritud polüstüreen, EPS aga paisutatud polüstüreen. Kahe materjali vahe on nende struktuuris – XPS on suletud kärgstruktuuriga ja seetõttu kaitstud vee sissetungimise eest, EPS struktuuris esineb üksikuid tühimikke ja selletõttu imab EPS väikeses koguses vett. XPS-i võib kasutada kõigil hoone tarinditel, EPS-i puhul peab jälgima, et pinnasega kokkupuutel kasutataks EPS Perimeetrit, mis on valmistatud spetsiaalsest toorainest ja tagab parema niiskuskindluse kui seinas kasutamiseks mõeldud EPS. Mitmetes populaarteaduslikes (15-year... 2008; Pfeifer 2013; XPS insulation... 2013) ja teaduslikes uurimistöödes (Cai jt 2018; Connor 2019; Pakkala, Lahdensivu 2014) on leitud tulemusi, mis tõestavad vahtpolüstüreenidel tootjate deklareeritust oluliselt suuremat niiskusimavust ja sellega seonduvalt soojustusomaduste vähenemist. Tulemused erinevad üksteisest oluliselt, mistõttu ei saa kujundada kindlat seisukohta, milline materjal pinnasesse paremini sobib.

Renoveerimistöödega alustada sooviv isik võib leida materjalitootjate kodulehtedelt erinevat infot, mis tekitab töid planeerides ja materjale valides segadust. Kõige kindlam viis vältimaks soojustuse märgumisest tulenevaid probleeme, on kasutatud isolatsioonimaterjali niiskuse eest võimalikult palju kaitsta. Pinnasest tekkiva niiskuscoormuse vähendamiseks isolatsioonimaterjalile on soovitatud drenaažisüsteemi rajamist. Sarnaselt hoone soojustamisele

vajab ka drenaažisüsteemi rajamine põhjalikku lähenemist. Rantala ja Leivo (2008) on leidnud, et vaatamata drenaažile jääb pinnas siiski niiskeks ja seetõttu on soojusisolatsiooni taga jätkuvalt niiske ka vundament.

Franzoni (2014) on toonud välja, et sokli soojustamisel kaob kapillaarniiskusel võimalus vundamendist välja kuivada ja horisontaalse hüdroisolatsiooni puudumisel tõuseb kapillaarniiskus kõrgemale seintesse. Rebane ja Russak (2019) ning eelkõige mitmed erialateadlased on oma uurimistöodes probleemi vältimiseks välja toonud horisontaalse hüdroisolatsiooni taastamise, mida palkhoonetel teostada ei ole keeruline, kuid plokkhoonetel Franzoni (2014) ja Sardella jt (2018) leitud andmete põhjal on problemaatiline.

Arvestades teaduskirjandusest saadud tulemusi, on lõputöö autor seisukohal, et vundamendi ja sokli soojustamine olemasoleval hoonel on väga keerukas ja kulukas ettevõtmine. Vundamendis ja soojustusmaterjalide ümber tuleb niiskus hoida võimalikult madalal. See eeldab korrektse drenaažisüsteemi rajamist ja vundamendi täielikku hüdroisoleerimist kõigilt külgedelt, et vältida pinnaseniiskuse tungimist vundamenti. Hüdroisoleerides ainult vertikaalsed pinnad, pääseb niiskus taldmiku alt siiski vundamenti. Kleepides soojustuse niiskele vundamendile, ei teki pinna ja liimi vahel piisavat naket, kapillaarniiskus koguneb soojustuse või hüdroisolatsiooni ja vundamendi vahele ning soe ja niiske pind on hallitusele hea kasvupind.

Vundamendi ja sokli soojustamata jätmisel jääb alles oluline külmasild sokli ja põranda vahel, mis vähendab märgatavalt hoone energiatõhusust. Head ja odavat lahendust vundamendi soojustamiseks ei ole, mistõttu peaks kaaluma soojustamise vajalikkust ning kulutõhusust, sest soojustus niiskes pinnases ei ole pikaajaliselt efektiivne. Ehitusseadustik on välja toonud, et energiatõhususe suurendamisel tuleb kaaluda erinevaid võimalusi ja eelistada kuluefektiivsemaid (Ehitusseadustik 2015, § 64 lg 2). Arvestades energiatõhususe karmistuvaid nõudeid ja vajadust vanasid hooneid renoveerida, võib kõige suurem probleem tekkida niiskusega kokkupuutes olevates konstruktsioonides.

Lõputöö autori hinnangul tuleb soklit ja vundamenti soojustades valida kahe variandi vahel – enne soojustamist võtta ette vundamendi täielik hüdroisoleerimine või jätta kõik puutumata. Lühiajalise efekti külmasilla likvideerimisel annab niiske vundamendi ja sokli soojustamine märgumise põhjust likvideerimata. Pikas perspektiivis pole selline lahendus tõhus, sest

niiskusega pidevas kokkupuutes oleva soojustuse soojusisolatsiooniomadused halvenevad ning niiske ja soe pind on hea kasvupind hallitusele. Sokli ja vundamendi efektiivne ja ajas püsiv soojustamine on seega komplitseeritud ja kulukas, kuid ilma selleta on energiatõhususe nõuetele vastavalt hoone renoveerimine keerukas. Külmasilda sokli ja põranda vahel on lihtsam leevendada õhupidavuse parandamisega liites, mis aga ei likvideeri probleemi täielikult, sest sokli soojusjuhtivus jääb kõrgeks.

Hoonete renoveerimisel võetakse tavaliselt vanad põrandad lahti, et hinnata nende seisukorda. Enamasti esineb vanades põrandates niiskuskahjustusi (Annala jt 2018) ja vana põrand asendatakse uue, soojustatud põrandaga. Lõputöö autori hinnangul on kõige mugavam ehitada betoonist põrand pinnasel ning ühtlasi tihendada korrektselt ka seina ja põranda liide. Betoonpõranda ja seina liite tihendamiseks on olemas toimivad lahendused ja neid on uurinud Peeter Antsov (2014) enda lõputöös. Lõputöö autor ei leidnud tõendus põhjust materjali puidust põranda tihendamisest. Õhutihedusega piirdes tagatakse ka elementaarne vastavus radoonihutusele.

Lõputöö autori hinnangul on kõige levinumateks põrandalahendusteks pinnasel põrandad ja tuulduvad põrandad. Pinnasel põranda lahendus, mille korral polüstüreen asetatakse otse drenivale täitepinnasele, kujutab endas siiski niiskussprobleeme. Rantala ja Leivo (2008) on leidnud, et drenivas täitepinnases on suhteline niiskussisaldus 100% ja selle tõttu on soojustus pidevalt kokkupuutes niiskusega. Drenivas pinnases, näiteks killustikus, on suhteline niiskussisaldus suur, kuid absoluutne niiskussisaldus väike ning soojustusmaterjalid mittehügroskoopsed, mistõttu lühiajaliselt on lahendus toimiv. Reeglina projekteeritakse hoonete elueaks 50 aastat, sama pikalt võiks hoone olla elamiskõlblik ka pärast renoveerimist. Pika aja jooksul võib pidev kokkupuude niiskusega soojustusmaterjali omadusi oluliselt muuta, mistõttu on kindlam lahendus soojustus niiskusest eraldada hüdroisolatsiooniga. Selliseks lahenduseks oleks näiteks betooni valamine drenivale pinnasele, eesmärgiga saavutada hüdroisolatsioonile tasane pind, hüdroisolatsiooni peale paigaldatakse koormusttaluv soojustus ja seejärel uuesti betoon. Võrreldes enamlevinud lahendusega kulub rohkem üks kiht betooni ja hüdroisolatsiooni, aga soojustus pole kokkupuutes niiskusega. Sama lahenduse on pakkunud kivivilla tootja "Rockwool" pinnasel põranda villaga soojustamisel, kuid seda võiks kasutada ka polüstüreenidega. Betoonpõranda võiks ehitada ka vundamendi servadele toetuma nagu

vahelae, sellisel juhul oleks tegemist tulduva põrandaga. Sein ja põrand liidet oleks võrreldes puidust põrandaga lihtne teostada, kuid keeruline oleks betoonplaati külmemalt poolelt soojustada. Puidust tulduvat põrandat talade vahelt soojustada pole keeruline ja konstruktsioon ei ole kokkupuutes pinnaseniiskusega.

Renoveerimistöde käigus tehtud muudatused välisseinas tunduvad väga olulised, kuna on visuaalselt kõige märgatavamad. Kõige suuremad soojakaod toimuvad läbi välisseinte, sest seinte kogupindala võrreldes teiste tarinditega on suurem. Seinte renoveerimislahenduste valik on väga lai, sest kasutada saab erinevaid soojusisolatsioonimaterjale, nagu näiteks mineraalvill, polüstüreenid ja polümeerid. Puithoonetel on levinud mineraalvilla kasutamine, sest viimase difusioonitakistus on väga madal ja niiskus pääseb puidust välja kuivama. Konstruktsioonis olev puit peaks olema piisavalt kuiv (niiskussisaldusega <16%) ja hoone kasutuse käigus ei peaks tingimused piirdes olema soodsad puidu liigsele niiskumisele ja hallituse tekkimisele. Sellistes tingimustes ei ima puit endasse liigset niiskust ja välja kuivamist intensiivselt toimuma ei pea ehk soojustusena võiks sobida ka polüstüreenid. Veeauru liikumine materjalides on kirjeldatav difusioonitakistuse väärtusega. Puidu ja vahtplastide difusioonitakistus jääb samasse vahemikku puiduga ja teoreetiliselt peaks puiduni jõudnud niiskus takistamatult liikuma edasi madalama veeauru osarõhuga keskkonna poole. Probleem võib tekkida talvel mil konstruktsiooni võib kondenseeruda vähesel määral vett. Reeglina kuivab talvel materjali kondenseerunud vesi suvel välja, aga lõputöö autor ei suutnud leida tõendus põhiseid allikaid, mis käsitlevad vahtplastide kuivamist. Populaarteaduslikes artiklites (*Sink or...* 2018; *XPS insulation...* 2014; *Drying potential...* 2014) on väidetud, et EPS soojustusest kuivab niiskus välja probleemideta. Palkhoone ebatasasuste tõttu pole võimalik vahtplast korralikult seinale kleepida, vahtplast karkassi vahele paigaldades jäävad õhukanalid sein ebatasasuse tõttu soojustuse taha. Polüuretaanvaht pihustatakse otse seinale ja sellega täidetakse kõik ebatasasused, mistõttu vahtplastiga esinevad probleemid on kõrvaldatud. Polüuretaanvaht pihustatakse seinale ehitatud puitkarkassi vahele, puidu niiskusdeformatsioonide toimele võib vaht karkassist lahti rebeneda ja tekivad õhulekked. Vahtplastide ja polümeeridega palkhoonete soojustamine on töö autori seisukohti arvestades küsitava väärtusega, aga teaduslikke uuringuid teema kohta ei leitud, mistõttu kindlat sesiukohta võtta ei saa. Plokkhoonetel on nii mineraalvillaga kui ka vahtplastiga soojustamine levinud. Mineraalvillaga soojustamisel on vajalik tuuletõkke kasutamine, lisasoojustatud seinte lahendustes on tihti kasutatud ka aurutõkkeid, mis peab asuma piirde

soojemal poolel. Aurutõkke vajaduse peab määrama insener niiskustehniliste arvutustega. Aurutõkke kasutamise vajadusel on väga oluline ka aurutõkke paigalduse kvaliteet, et tagada selle toimivus. Piirete soojustamine on väga lai teema ja tehtud uuringute otsimine ja välja toomine on võimalik uus lõputöö teema tulevastel aastatel.

Kõige kriitilisemad külmasillad esinevad avatäidete ümbruses, mistõttu on akende ja uste vahetamine või täiendav tihendamine oluline. Nullenergiatõhusa hoone nõuetele vastavalt renoveerides pole vanad aknaraamid piisava soojapidavusega ja aknad tuleb välja vahetada uute vastu. Renoveerimistöid kavandades peab enne seinte soojustamist arvestama, et otstarbekas oleks aknad viia samale tasapinnale soojustusega. Kolme erinevat meetodit akende asukoha muutmiseks ja kinnitamiseks on uurinud Hallik ja Kalamees (2020), kes töid välja puidust raami ehitamise, klambritega akna kinnitamise või spetsiaalse seinale liimitava akent kandva soojustusmaterjali. Puitprussidest raamiga lahenduse puhul on akna joonsoojuslähivus ligi kaks korda suurem kui kasutades klambreid või tugevdatud soojustust. Puidu soojusjuhtivus on võrreldes soojustusmaterjalidega palju kõrgem, mis tekitab akende servadesse külmasilla. Lisaks paisub ja kahaneb puit aja jooksul, mistõttu võivad akende tihendusmaterjalid järgi anda ja külmasild süveneb veelgi õhulekete tõttu. Uutel ehitusjärgus ja renoveeritavatel hoonetel võib näha üllatavalt palju puitprussidest raamide kasutamist aknaavade ümber, kuigi olemas on efektiivsemaid lahendusi.

Vahetades aknad uute vastu või säilitades vanad, jättes aknad seinaga samasse tasapinda või tõstes soojustusse, on oluline avatäited tihendada tuule- ja aurutihedalt. Selleks on sobivaimad teibid, aga ka erinevad tihendusribad. Oluline on takistada veeauru liikumine toast avatäite liitesse ja tihendada väljast ilmastikukindlalt. Kasutades soojapidavaid aknaid, korrektset soojustuse tasapinda viimise meetodit ja tihendamist, on võimalik avatäited ja nende ümbrus saada pikaajaliselt energiatõhusaks.

Hoone õhutihedaks renoveerimisel muutub väga oluliseks ventilatsioon. Kõrge energiaklassi saavutamiseks sobib kõige paremini soojustagastusega ventilatsioon, mis tähendab ventilatsiooniagregaadi ja torustiku olemasolu hoones. Tavaliselt asub ventilatsiooniagregaat pööningul, millelt liiguvad torud läbi katuse või seina ja vahelagede esimesele korrusele. Iga toru läbiviik on potentsiaalne õhulekkekoht, mille tihendamisel tuleb olla sama hoolas kui teiste hoone sõlmede korral. Lisaks torudele tekitavad välispiirdest läbiviike veel ka valgusallikad ja

pistikud. Kirjandusest analüüsides leiti, et torude läbisuste tihendamiseks sobivad kõige paremini spetsiaalsed mansetid mis peavad vastu torude võimalikele liikumistele ehituse ajal ja mida on lihtsam kleepida ümber ümara toru. Elektriinstallatsioonide tihendamiseks lahendusi ei leitud. Küttekollete labiviikude lahendusi reguleerivad Päästeamet ja Tuleohutuse seadus (Tuleohutuse seadus 2010) koos selles viidatud määrustega.

KOKKUVÕTE

Seoses elementaarsest vajadusest olemasolevaid hooneid hooldada ning Euroopa Liidu ja Eesti energiatõhususe poliitilise konseptsiooni arengust, on hoonete renoveerimine muutumas aina komplekssemaks ja keerukamaks. Määrused seavad renoveerimistööde tulemustele eesmärgid ja kallinevad ehitus- ja energiahinnad sunnivad hoonete omanikke ja projekteerijaid leidma tõhusaid lahendusi, mis oleks ajas püsivad ja täidaksid soovitud eesmärgi.

Lõputöö esimeseks eesmärgiks oli palk- ja plokkhoonete soojus- ja niiskustehniliste probleemide kirjeldamine, kasutades varasemalt koostatud Eesti Maaülikooli ehitusinseneriõppe lõputöid ja teaduskirjanduses avaldatud artikleid. Varasemaid lõputöid otsides leiti, et hoonete seisukorra hindamisi on läbi viidud ja renoveerimisvõimalusi pakutud. Enamus varasemalt läbi viidud lõputöödest käsitlesid plokkidest ja paneelidest korterelamuid või puitkarkassist eramuid. Käesoleva lõputöö autorit huvitasid palk- ja plokkhooned seoses isikliku huviga antud konstruktsiooniga elamute vastu. Soojus- ja niiskustehniliste probleemide kirjeldamisel kasutati lisaks teaduskirjandusele põhjalikumalt ka ühte magistritööd, mis käsitles autorit huvitanud palkhoonet. Plokkhoonest eramut põhjalikult analüüsivat magistritööd lõputöö autor ei leidnud ja plokkhoone ehitustehnilise seisukorra analüüsi võib läbi viia tulevastel aastatel. Teaduskirjanduse põhjal kirjeldatud soojus- ja niiskustehnilised probleemid olid sarnased lõputööde seisukorra hindamistel leitud tulemustega, mille põhjal saab teha üldistusi renoveerimistööde planeerimiseks ja uute tehniliste seisukorra hindamiste läbiviimiseks.

Suurimaks probleemiks vanadel hoonetel võib pidada halba õhupidavust, mida ilmestavad uurimistöodes tehtud mõõtmised ja õhupidavusega seonduvate artiklide suur hulk. Palkhooned on keskmiselt suurema õhulekkearvuga kui plokkhooned. Õhulekkekohti leiti kõigist välispiiretega piirnevatest sõlmedest, sõltumata hoone konstruktsioonist. Niiskusega seonduvaid probleeme esines kõigis ehitustehnilist seisukorda käsitlevates töodes ja niiskuskahjustuste levikut on uuritud mitmetes teadusartiklites. Põhiliselt tekivad

niiskuskahjustused välisseintele akende alla vihmavee puudulikust eemale juhtimisest ning tuulduvate põrandate alla niiskuse puuduliku eemale juhtimise tõttu.

Lõputöö teiseks eesmärgiks oli palk- ja plokkhoonetel leitud niiskus- ja soojustehniliste probleemidele renoveerimislahenduste leidmine. Renoveerimislahenduste leidmiseks toodi välja teaduskirjanduses pakutavad lahendused ja analüüsiti neid enda kogemustele ja varasemalt kaitsitud Eesti Maaülikooli lõputööle tuginedes. Suur informatsiooni hulk ja materjalitootjate vajadus tooteid turustada paneb ehitust planeeriva isiku keerulisse seisu, millest tulenevalt prooviti teaduskirjandusest leida uuringuid, mis võrdleksid erinevaid lahendusi, et lõputöö lugejal tekiks ülevaade erinevatest võimalustest ja nende toimivusest. Kõige enam analüüsiti erinevaid tihendusmaterjale võrdlevaid uuringuid.

Kõige keerukamaks võib pidada vundamendite ja soklite renoveerimist. Uuritud artiklite põhjal leiti, et sokli ja põranda liitekohas esinevat külmasilda on kõige mõistlikum leevendada liite õhupidavuse parandamisega. Külmasilla likvideerimine vajab sokli soojustamist, kuid probleeme ja lahendusi analüüsides leiti, et sokli soojustamine võib osutuda renoveerimisprotsessi keerukaimaks ettevõtmiseks. Põrandate lahenduste analüüsimisel leiti, et põranda ja seina liitekoha tihendamist on Eesti Maaülikooli lõputöös põhjalikult uuritud ja saadud tulemusi saab praktikas hästi ära kasutada. Põrandaaluse pinnase suurt niiskussisaldust ja soojustusmaterjalide niiskusimavust analüüsides leiti, et pinnasel põranda lahenduse puhul võiks soojustust niiskuse eest paremini kaitsta kui ainult soojustusw otse drenivale pinnasele asetamine. Erinevate sõlmede tihendamist käsitlevaid töid uurides leiti, et sama oluline kui tööks parima materjali valik on ka korralik töö kvaliteet. Avatäidete tihendamiseks ja soojustusega samale tasapinnale viimiseks võrreldi erinevaid meetodeid. Leiti, et tänapäevalgi tihti ehitusel esinevat puitprussidest raami ehitamist akende kinnitamiseks ei saa pidada jätkusuutlikuks lahenduseks ning olemas on kaasaegsemad lahendused. Avatäidete tihendamisel on lisaks montaaživahule või muule isolatsioonimaterjalile vaja kasutada ka sisemisi aurukindlaid ja välimisi ilmastikukindlaid teipe. Palkseinte tihendamist uurides leiti, et lisaks looduslikele materjalidele sobivad kasutamiseks ka tööstuslikud materjalid, mis toimivad hästi ka palkide niiskusdeformatsioonide korral.

Arvestades ehitamise kulukust ning energiatõhususe poliitilise konseptsiooni arengut on mõistlikum juba täna planeerides renoveerimist mõelda liginullenergia hoonete nõuetele. Arutledes erinevate probleemide ja lahenduste üle leiti, et energiatõhusamaks renoveerimiseks on vahendid ja teadmised olemas, ning teadvustada tuleb tööde tegemise kvaliteedi olulisust. Oluline on erinevaid võimalusi võrdlevate uuringute välja toomine ja lahenduste kasutusse võtmine.

KASUTATUD KIRJANDUS

- Alev, Ü., Eskola, L., Arumägi, E., Jokisalo, J., Donarelli, A., Siren, K., Broström, T., Kalamees, T.** (2014). Renovation alternatives to improve energy performance of historic rural houses in the Baltic Sea region. - *Energy and Buildings*. Vol. 77, pp. 58-66. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.03.049> (26.04.2021)
- Alev, Ü., Kalamees, T.** (2016). Avoiding mould growth in an interiorly insulated log wall. - *Building and Environment*. Vol. 105, pp. 104-115. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.05.020> (26.04.2021)
- Alev, Ü., Uus, A., Kalamees, T.** (2017). Airtightness improvement solutions for log wall joints. - *Energy Procedia*. Vol. 132, pp. 861-866. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.678> (26.04.2021)
- Alev, Üllar.** 2017. Eesti puidust maaelamute renoveerimine ja energiatõhususe parandamine. Doktoritöö. Tallinna Tehnikaülikooli inseneriteaduskond ehituse ja arhitektuuri instituut. Tallinn. 96 lk.
- Annala, P. J., Hellemaa, M., Pakkala, T. A., Lahdensivu, J., Suonketo, J., Pentti, M.** (2017). Extent of moisture and mould damage in structures of public buildings. - *Case studies in construction materials*. Vol. 6, pp. 103-108. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2017.01.003> (26.04.2021)
- Annala, P. J., Lahdensivu, J., Suonketo, J., Pentti, M., Vinha, J.** (2018). Need to repair moisture-and mould damage in different structures in Finnish public buildings. - *Journal of building engineering*. Vol. 16, pp. 72-78. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2017.12.010> (26.04.2021)
- Antsov, Peeter.** 2014. Hoone sein ja põranda liitekoha õhulekke vähendamine radooniturvalisuse tagamiseks. Magistritöö. Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 97 lk.
- Ástmarsson, B., Jensen, P. A., Maslesa, E.** (2013). Sustainable renovation of residential buildings and the landlord/tenant dilemma. - *Energy Policy*. Vol. 63, pp. 355-362. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2013.08.046> (26.04.2021)
- Baasfinantseeritav uurimistöö P8003. Hoonete elutsükli keskkonnasäästlikkuse hindamine, analüüs ja modelleerimine. Lõpparuanne. (2012). Tartu: Eesti Maaülikool.
- Becher, R., Høie, A. H., Bakke, J. V., Holøs, S. B., Øvrevik, J.** (2017). Dampness and moisture problems in Norwegian homes. - *International journal of environmental research and public health*. Vol. 14(10). [e-ajakiri] https://www.researchgate.net/publication/320462684_Dampness_and_Moisture_Problems_in_Norwegian_Homes (11.05.2021)

- Bjarløv, S. P., Vladyková, P.** (2011). The potential and need for energy saving in standard family detached and semi-detached wooden houses in arctic Greenland. - *Building and Environment*. Vol. 46(8), pp. 1525-1536. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.004> (26.04.2021)
- Bracke, Wolf, Van Den Bossche, N., Janssens, A.** (2014). Airtightness of building penetrations: air sealing solutions, durability effects and measurement uncertainty. - *35th Conference: Ventilation and airtightness in transforming the building stock to high performance*. Poznan, Poland, pp. 488–500. <https://biblio.ugent.be/publication/5741036>
- Building pathology. A state-of-the-art report. CIB Report. (1993). London: CIB. [veebileht] <https://www.irbnet.de/daten/iconda/CIB11719.pdf> (31.05.2021)
- Cai, S., Zhang, B., Cremaschi, L.** (2018). Moisture behavior of polystyrene insulation in below-grade application. - *Energy and Buildings*. Vol. 159, pp. 24-38. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.10.067> (26.04.2021)
- Chan, W. R., Joh, J., & Sherman, M. H.** (2013). Analysis of air leakage measurements of US houses. - *Energy and Buildings*. Vol. 66, pp. 616-625. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2013.07.047> (26.04.2021)
- Connor, B.** (2019). Comparison of polystyrene expanded and extruded foam insulation in roadway and airport embankments. USA: University of Alaska
<https://scholarworks.alaska.edu/bitstream/handle/11122/10071/Comparison%20of%20EPS%20and%20XPS%20in%20Embankments%20Final%20Report%20with%20appendicies.pdf?sequence=1> (03.05.2021)
- Domhagen, F., Wahlgren, P.** (2017). Consequences of varying airtightness in wooden buildings. - *Energy Procedia*. Vol. 132, pp. 873-878. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.09.688> (26.04.2021)
- Ehituskonstruksioonid. (2009). Piirdetarindid. Osa 1: Üldnõuded: Eesti standard EVS 837-1:2003. Tallinn: Eesti standardikeskus. [veebileht] <https://www.evs.ee/et/evs-837-1-2003> (18.05.2021)
- Ehitusseadustik. (vastu võetud 11.02.2015, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 01.03.2021). – *Riigi Teataja*. [veebileht] <https://www.riigiteataja.ee/akt/130122020006?leiaKehtiv> (22.05.2021)
- Energiatõhususe miinimumnõuded. Vabariigi Valitsuse määrus nr 258. (vastu võetud 20.12.2007). – *Riigi Teataja*. [veebileht] <https://www.riigiteataja.ee/akt/12903585> (22.05.2021)
- Energiatõhususe miinimumnõuded. Vabariigi Valitsuse määrus nr 68. (vastu võetud 30.08.2012). – *Riigi Teataja*. [veebileht] <https://www.riigiteataja.ee/akt/105092012004> (22.05.2021)
- EPS Industry Alliance. (2008). 15-Year in-situ research shows EPS outperforms XPS in R-value retention. [veebileht] <https://www.epsindustry.org/sites/default/files/EPS%20Below%20Grade103.pdf> (03.05.2021)

- EPS Industry Alliance. (2013). XPS insulation extracted after field exposure confirms high water absorption & diminished R-value. [veebileht]
https://www.epsindustry.org/sites/default/files/Below_Grade_105_33116.pdf (03.05.2021)
- EPS Industry Alliance. (2014). Drying Potential of Polystyrene Insulations Under Extreme Environmental Cycling Conditions. [veebileht]
<http://epsindustry.org/sites/default/files/EPS%20Below%20Grade%20104.pdf> (27.05.2021)
- EPS Industry Alliance. (2014). XPS insulation tests confirm diminished R-value when exposed to water absorption. [veebileht] <http://epsindustry.org/news/xps-insulation-tests-confirm-diminished-r-value-when-exposed-water-absorption> (27.05.2021)
- Euroopa parlamendi ja nõukogu direktiiv 2010/31/EL, hoonete energiatõhususe kohta. (vastu võetud 19.05.2010). – *Euroopa Liidu Teataja*. [veebileht] <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ET/TXT/?uri=CELEX%3A02010L0031-20210101> (28.05.2021)
- Falchi, L., Zendri, E., Capovilla, E., Romagnoni, P., De Bei, M.** (2017). The behaviour of water-repellent mortars with regards to salt crystallization: from mortar specimens to masonry/render systems. - *Materials and Structures*. Vol. 50(1), pp. 1-15. [e-ajakiri]
<https://doi.org/10.1617/s11527-016-0891-8> (01.05.2021)
- Franzoni, E.** (2014). Rising damp removal from historical masonries: A still open challenge. - *Construction and Building Materials*. Vol. 54, pp. 123-136. [e-ajakiri]
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.12.054> (26.04.2021)
- Franzoni, E.** (2018). State-of-the-art on methods for reducing rising damp in masonry. - *Journal of Cultural Heritage*. Vol. 31, pp. S3-S9. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.04.001> (01.05.2021)
- Frössel, F.** (2006). Masonry drying and cellar rehabilitation. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag. 278 lk.
- Gavrilović, D. J.** (2011). Building waterproofing remediation applying the “total cut method”. - *Architecture and Civil Engineering*. Vol. 9(1), pp. 105-118. [e-ajakiri]
<https://doi.org/10.2298/FUACE1101105G> (01.05.2021)
- Gillott, M. C., Loveday, D. L., White, J., Wood, C. J., Chmutina, K., Vadodaria, K.** (2016). Improving the airtightness in an existing UK dwelling: The challenges, the measures and their effectiveness. - *Building and Environment*. Vol. 95, pp. 227-239. [e-ajakiri]
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.08.017> (26.04.2021)
- Haas, D., Habib, J., Galler, H., Buzina, W., Schlacher, R., Marth, E., Reinthaler, F. F.** (2007). Assessment of indoor air in Austrian apartments with and without visible mold growth. - *Atmospheric Environment*. Vol. 41(25), pp. 5192-5201. [e-ajakiri]
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2006.07.062> (22.05.2021)

- Hallik, J., Gustavson, H., Kalamees, T.** (2019) Air leakage of joints filled with polyurethane foam. – *Buildings*. Vol 9(7), pp. 172-187. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.3390/buildings9070172> (15.05.2021)
- Hallik, J., Kalamees, T.** (2020) Akna ja seina liitekoha soojuskao ja niiskusturvalisuse arvutuslik uuring. Aruanne. Tallinn. Tallinna Tehnikaülikooli ehituse ja arhitektuuri instituut. [veebileht] <https://vbh.ee/wp-content/uploads/2020/10/Akna-seinakinnituse-kulmasildade-uuring.pdf> (26.04.2021)
- Harris, Y, S. (2001) Building pathology: Deterioration, diagnostics, and intervention. New York: John Wiley & Sons. 672 lk.
- Haverinen-Shaughnessy, U., Borrás-Santos, A., Turunen, M., Zock, J. P., Jacobs, J., Krop, E. J. M., Casas, L., Shaughnessy, R., Tubel, M., Heederik, D., Hyvärinen, A., Pekkanen, J., Nevalainen, A., HITEA Study Group.** (2012). Occurrence of moisture problems in schools in three countries from different climatic regions of Europe based on questionnaires and building inspections – the HITEA study. - *Indoor Air*. Vol. 22(6), pp. 457-466. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2012.00780.x> (22.05.2021)
- Hoone energiatõhususe arvutamise metoodika. Majandus- ja taristuministri määrus nr 58. (vastu võetud 05.06.2015). – *Riigi Teataja*. [veebileht] <https://www.riigiteataja.ee/akt/109062015021?leiaKehtiv> (26.04.2021)
- Hoone energiatõhususe miinimumnõuded. Ettevõtlus- ja infotehnoloogiaministri määrus nr 63. (vastu võetud 11.12.2018). - *Riigi Teataja*. [veebileht] <https://www.riigiteataja.ee/akt/113122018014> (26.04.2021)
- Hoone energiatõhususe miinimumnõuded. Majandus- ja taristuministri määrus nr 55. (vastu võetud 03.06.2015). - *Riigi Teataja*. [veebileht] <https://www.riigiteataja.ee/akt/105062015015> (26.04.2021)
- Howden-Chapman, P., Saville-Smith, K., Crane, J., Wilson, N.** (2005). Risk factors for mold in housing: a national survey. - *Indoor air*. Vol. 15(6), pp. 469-476. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1111/j.1600-0668.2005.00389.x> (22.05.2021)
- Insulfoam. (2018). Sink or swim. EPS moisture performance. [veebileht] <https://www.insulfoam.com/sink-or-swim-eps-moisture-performance/> (28.05.2021)
- Jensen, P. A., Maslesa, E.** (2015). Value based building renovation—A tool for decision-making and evaluation. - *Building and Environment*. Vol. 92, pp. 1-9. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.04.008> (26.04.2021)

- Kalamees, T.** (2016) Õppematerjal. Ehitusfüüsika II osa lk 31-78. Tallinna Tehnikaülikool
https://old.taltech.ee/public/p/projektid/BuildEst/Ehitusfuusika_II_Osa_T_Kalamees.pdf
 (04.05.2021)
- Kalamees, T., Alev, Ü., Pärnalaas, M.** (2017a). Air leakage levels in timber frame building envelope joints. - *Building and Environment*. Vol. 116, pp. 121-129. [e-ajakiri]
<https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.02.011> (26.04.2021)
- Kalamees, T., Arumägi, E., Alev, Ü.** (2018). Performance of interiorly insulated log wall: Experiences from Estonian cold climate conditions. - *The 3rd International Conference on Energy Efficiency in Historic Buildings (EEHB2018)* (Eds. T. Broström, L. Nilsen, S. Carlsten), Visby, Sweden, pp. 99-107. [konverents] <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1295314/FULLTEXT01.pdf>
- Kalamees, T., Kuusk, K., Arumägi, E., Alev, Ü.** (2017b). Cost-effective energy and indoor climate renovation of Estonian residential buildings. - *Cost-Effective Energy Efficient Building Retrofitting* /Koost. F. Pacheco-Torgal, C-G. Granqvist, B.P. Jelle, G.P. Vanoli, N. Bianco, J. Kurnitski. Woodhead Publishing Series in Civil and Structural Engineering. Kidlington: Elsevier, lk 405-454 [e-kogumik] <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-101128-7.00015-0> (01.05.2021)
- Kalbe, K., Kalamees, T.** (2019). Influence of Window Details on the Energy Performance of an nZEB. - *Journal of Sustainable Architecture and Civil Engineering*. Vol. 24(1), pp. 61-70. [e-ajakiri]
<https://doi.org/10.5755/j01.sace.24.1.23234> (26.04.2021)
- Kiisel, Andreas.** 2019. Valga Riia tänav 5 puitkonstruktsioonide seisukorra analüüs ja restaureerimislahendused. Magistritöö. Eesti Maaülikooli Metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 108 lk.
- Kredex juhendmaterjal. (2017). Liginullenergia eluhoone. Väikemaja juhend [veebileht]
https://kredex.ee/sites/default/files/2019-03/Liginullenergia_eluhooned_Vaikemaja_juhend.pdf
 (18.05.2021)
- Leivo, V., Rantala, J.** (2008). Moisture behaviour of slab-on-ground structures in operating conditions: Steady-state analysis. - *Construction and Building Materials*. Vol. 22 (4), pp. 526-531. [e-ajakiri]
<https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2006.11.008> (26.04.2021)
- Lubelli, B., van Hees, R. P. J., Bolhuis, J.** (2018). Effectiveness of methods against rising damp in buildings: Results from the EMERISDA project. - *Journal of Cultural Heritage*. Vol. 31, pp. S15-S22. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.025> (26.04.2021)
- Maaelamute sisekliima, ehitusfüüsika ja energiasääst. Uuringu I etapi lõpparuanne. (2011) Tallinn: Tallinna Tehnikaülikool. https://www.etis.ee/File/DownloadPublic/28208bc8-c78a-41ca-9409-0a3a95a54189?name=Fail_Raport%202.0HQ.pdf&type=application%2Fpdf (26.04.2021)
- Masso, T.** (1990). Väikemajad. Tallinn: Valgus. 239lk

- Mortensen, L. H., Bergsøe, N. C.** (2017). Air tightness measurements in older Danish single-family houses. - *Energy Procedia*. Vol. 132, pp. 825-830. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.10.016> (26.04.2021)
- Muinsuskaitseamet.** (s.a). Vundament ja sokkel. Parandamine ja parendamine. [veebileht] <https://www.muinsuskaitseamet.ee/et/vundament-ja-sokkel-parandamine-ja-parendamine> (01.05.2021)
- Nemvalts, Liis.** 2016. Maakivist müüritise seisukorra hindamine, tegevuskava renoveerimiseks ja katuse kandekonstruktsioonide tugevusarvutused. Magistritöö. Tallinna Tehnikaülikooli Tartu Kolledži Säätva tehnoloogia õppetool. Tartu. 101 lk.
- Nõuded energiamärgise andmisele ja energiamärgisele.** Majandus- ja taristuministri määrus nr 36. (Vastu võetud 30.04.2015). – *Riigi Teataja*. [veebileht] <https://www.riigiteataja.ee/akt/106052015002> (22.05.2021)
- Nusser, B., Teibinger, M., Bachinger, J., Austria, H., Sachverständiger, W.** (2017) Winddichtheit nach Bedarf. - *Holzbau Die Neue Quadriga*. No. 1, pp. 27-31. [e-ajakiri] https://www.researchgate.net/publication/316551042_Winddichtheit_nach_Bedarf_-_Leitfaden_zur_bedarfsgerechten_Ausfuhrung_des_winddichten_Anschlusses_an_der_Traufe_und_dem_Ortgang_gedammter_Steildacher (26.04.2021)
- Palkmajakeskus.** (s.a). Jäik polüetüleenist tihendusriba. [veebileht] <http://palkmajakeskus.ee/ee/tools/backer-rod/> (06.05.2021)
- Pallin, S., Kehrre, M.** (2013). Hygrothermal simulations of foundations: Part 1: Soil material properties. - *Journal of Building Physics*. Vol. 37(2), pp. 130-152. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1177/1744259112467526> (26.04.2021)
- Pavliková, M., Pavlik, Z., Keppert, M., Černý, R.** (2011). Salt transport and storage parameters of renovation plasters and their possible effects on restored buildings' walls. - *Construction and Building Materials*. Vol. 25(3), pp. 1205-1212. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.09.034> (01.05.2021)
- Pfeifer, H.** (2013). Wasseraufnahme von Polystyrol-Dämmstoff EPS. – *Bau SV*. [koduleht] <http://www.bau-sv.de/wasseraufnahme-von-polystyrol-daemmstoff-eps/> (03.05.2021)
- Rantala, J., Leivo, V.** (2008). Thermal, moisture and microbiological boundary conditions of slab-on-ground structures in cold climate. - *Building and environment*. Vol. 43(5), pp. 736-744. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2007.01.015> (26.04.2021)
- Rantala, J., Leivo, V.** (2009). Heat, air, and moisture control in slab-on-ground structures. - *Journal of Building physics*. Vol. 32(4), pp. 335-353. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1177/1744259108093919> (26.04.2021)

- Rebane, Mikk., Russak, Joosep.** 2019. Reisbergi talu ehitustehniline seisukorra hindamine ja eluhoone renoveerimislahenduste väljatoomine koos maksumuse analüüsiga. Magistritöö. Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 181 lk.
- Relander, T. O., Thue, J. V., Gustavsen, A.** (2008). Air tightness performance of different sealing methods for windows in wood-frame buildings. - *Proceedings of the 8th symposium on building physics in the nordic countries* (Eds. C. Rode), Copenhagen, Denmark. Paper no. R-189, pp 417-424. [konverents]
<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.546.6683&rep=rep1&type=pdf>
- Salonen, H., Lappalainen, S., Lindroos, O., Harju, R., Reijula, K.** (2007). Fungi and bacteria in mould-damaged and non-damaged office environments in a subarctic climate. - *Atmospheric Environment*. Vol. 41(32), pp. 6797-6807. [e-ajakiri]
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.04.043> (22.05.2021)
- Sardella, A., De Nuntiis, P., Bonazza, A.** (2018). Efficiency evaluation of treatments against rising damp by scale models and test in situ. - *Journal of Cultural Heritage*. Vol. 31, pp. S30-S37. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.020> (01.05.2021)
- Sardella, A., De Nuntiis, P., Rizzo, M., Giosuè, C., Tittarelli, F., Bonazza, A.** (2018). In situ performance evaluation of chemical injections against rising damp: A case study in Italy. - *Measurement*. Vol. 130, pp. 128-136. [e-ajakiri]
<https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.08.011> (03.05.2021)
- Soojusisolatsioon. (2008). Ehitusmaterjalid ja -tooted. Soojus- ja niiskustehnilised omadused. Tabuleeritud arvutusväärtused ja deklareeritavate ning arvutusväärtuste määramise meetodid: Eesti standard EVS-EN ISO 10456:2008. Tallinn: Eesti standardikeskus. [veebileht] <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-10456-2008> (22.05.2021)
- Soojusisolatsioon. (2016). Hoone piirdetarindi soojusläbivuse arvutusjuhend. Osa 1: Välisõhuga kontaktis olev läbipaistmatu piire: Eesti standard EVS 908-1:2016. Tallinn: Eesti standardikeskus. [veebileht] <https://www.evs.ee/et/evs-908-1-2016> (22.05.2021)
- Soojusisolatsioon. (2017). Hoonete piirdetarindid ja komponendid. Soojustakistus ja soojusläbivus. Arvutusmeetodid: Eesti standard EVS-EN ISO 6946:2017. Tallinn: Eesti standardikeskus. [veebileht] <https://www.evs.ee/et/evs-en-iso-6946-2017> (22.05.2021)
- Statistikaamet. (2020). Kes tahab elada minevikus, ostab maja. [veebileht] <https://www.stat.ee/et/uudised/2020/07/24/kes-tahab-elada-minevikus-ostab-maja> (26.04.2021)
- Thomsen, K. E., Rose, J., Mørck, O., Jensen, S. Ø., Østergaard, I., Knudsen, H. N., Bergsøe, N. C.** (2016). Energy consumption and indoor climate in a residential building before and after

- comprehensive energy retrofitting. - *Energy and Buildings*. Vol. 123, pp. 8-16. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.04.049> (03.05.2021)
- Tiitsaar, Mehis.** (2018). Puidust tugiraam aknapaigaldusel. [veebileht] <https://vbh.ee/2018/09/18/tugiraam15/> (15.05.2021)
- Tuleohutuse seadus. (vastu võetud 05.05.2010, muudetud, täiendatud, viimati jõustunud 01.04.2021). – *Riigi Teataja*. [veebileht] <https://www.riigiteataja.ee/akt/122032021009?leiaKehtiv> (29.05.2021)
- Van Den Bossche, N., Huyghe, W., Moens, J., Janssens, A., Depaepe, M.** (2012). Airtightness of the window–wall interface in cavity brick walls. - *Energy and buildings*. Vol. 45, pp. 32-42. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.10.022> (05.05.2021)
- Van Den Bossche, N., Janssens, A.** (2016). Airtightness and watertightness of window frames: Comparison of performance and requirements. - *Building and Environment*. Vol. 110, pp. 129-139. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2016.09.034> (26.04.2021)
- Van Hees, R. P., Lubelli, B., Hacquebord, A.** (2018). New test methods to verify the performance of chemical injections to deal with rising damp. - *Journal of Cultural Heritage*. Vol 31, pp. S52-S59. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.03.024> (01.05.2021)
- Van Linden, S., Van Den Bossche, N.** (2020). Airtightness of sealed building joints: Comparison of performance before and after artificial ageing. - *Building and Environment*. Vol. 180, pp. 107010. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2020.107010> (26.04.2021)
- Vee mõju vundamendi konstruktsioonile. (s.a). [veebileht] <https://www.ee.weber/vee-moju-vundamendi-konstruktsioonile> (26.04.2021)
- Vinha, J., Manelius, E., Korpi, M., Salminen, K., Kurnitski, J., Kiviste, M., Laukkanen, A.** (2015). Airtightness of residential buildings in Finland. - *Building and Environment*. Vol. 93, pp. 128-140. [e-ajakiri] <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2015.06.011> (26.04.2021)
- Õunapuu, L.** (2014). Kvalitatiivne ja kvantitatiivne uurimisviis sotsiaalteadustes. Tartu Ülikool. [e-õpik] <http://dspace.ut.ee/handle/10062/36419> (10.05.2021)

**Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning
juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta**

Mina, Tenno Liivatalu,
sünniaeg 13.04.1996,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

Soojus- ja niiskustehnilised probleemid palk- ja plokkhoonete piirdetarinditel ning
renoveerimislahendused,

mille juhendaja on Kaarel Sahk

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks kuni autoriõiguse kehtivuse
tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega
isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(allkiri)

Tartu, 31.05.2021

Juhendaja kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(juhendaja nimi ja allkiri)

(kuupäev)